



Santeri Rajala

Kysyntäjouaston potentiaalin määrittäminen asuinkerrostaloissa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi
diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 7.5.2020

Valvoja: Professori Risto Kosonen

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Olli Nummelin

Tekijä Santeri Rajala

Työn nimi Kysyntäjoustopotentiaalin määrittäminen asuinkerrostaloissa

Maisteriohjelma Advanced Energy Solutions

Koodi ENG3068

Työn valvoja Professori Risto Kosonen

Työn ohjaaja(t) Diplomi-insinööri Olli Nummelin

Päivämäärä 7.5.2020

Sivumäärä 80+5

Kieli suomi

Tiivistelmä

HOLISDER on EU:n innovaatio- ja tutkimusohjelman H2020 rahoittama projekti. Projektin tavoitteena on mahdollistaa kokonaisvaltainen kysyntäjoustopotentiaalin optimointi rakennuksissa ja asuinalueilla integroimalla energianhallintajärjestelmien älyä. Projektissa yhdistetään laaja valikoima kehittyneitä teknologioita sekä integroidaan ne avoimeen, yhteentoimivaan ja turvalliseen tiedonhallinnan viitekehykseen, jonka on arvioitu mahdollistavan huomattavan vähennyksen rakennusten energiakustannuksissa.

HOLISDER-projektissa kokonaisvaltaisen kysyntäjoustopotentiaalin optimoinnin mahdollistava tiedonhallinnan viitekehys validoidaan pilotoinnin avulla erityyppisissä rakennuksissa, missä Suomen pilottikohteina ovat kauppakeskus, toimistorakennus ja asuinkerrostalo. Tämän diplomityön tarkoituksena on tukea HOLISDER-projektin tavoitteita määrittämällä kehitettyjen ratkaisujen kysyntäjoustopotentiaali asuinkerrostalon energiakustannuksien vähentämisessä Suomen pilottikohteiden osalta.

Kysyntäjoustopotentiaali rakennuksissa määritetään vertailemalla pilottikohteiden energiankulutusta ja energiakustannuksia niiden lähtötilanteisiin nähden ennen kysyntäjoustopotentiaalin optimointia. Pilottikohteiden lähtö- ja lopputilanteiden energiankulutuksen ja energiakustannuksien määrittämisessä hyödynnetään rakennusten Ener-Key-energianhallintajärjestelmistä saatavia sähkön ja kaukolämmön päämittaustietoja sekä julkista tietoa niiden nykyisistä kaukolämpö- ja sähkötariffeista.

Suomen pilottikohteiden lopputilanne on määritetty vain asuinkerrostalon osalta eksplisiittisen kysyntäjoustopotentiaalin ollessa HOLISDER-projektissa edelleen kehitysvaiheessa. Kysyntäjoustopotentiaalin optimoinnin avulla asuinkerrostalon energiakustannuksia vähennettiin 5,3 prosentilla lähtötilanteeseen nähden. Tämän lisäksi asuinkerrostalon sähkönkulutusta vähennettiin 7,0 prosentilla ja kaukolämmön kulutusta 5,1 prosentilla. Samalla pienennettiin myös asuinkerrostalon sähkön kuormitushuippua 14,6 prosentilla ja kaukolämmön kuormitushuippua 13,4 prosentilla.

Kysyntäjoustopotentiaalin optimointi osoittaa huomattavaa potentiaalia rakennusten energiakustannuksien vähentämisessä. Kysyntäjoustopotentiaali soveltuu hyvin myös tasapainottamaan rakennuksen energiankulutusta sekä pienentämään sähkön ja kaukolämmön kuormitushuippuja. Kysyntäjoustopotentiaali rakennuksissa on määritettävä kuitenkin aina rakennuskohtaisesti erilaisten rakennusten käyttötarkoitusten, tilojen käyttöasteiden, loppukäyttäjien, rakennusautomaatiojärjestelmien sekä kaukolämpö- ja sähkötariffien takia.

Avainsanat kysyntäjoustopotentiaali, asuinkerrostalo, energiankulutus, energiakustannukset, HOLISDER



Author Santeri Rajala

Title of thesis Determination of demand response potential in residential multi-storey buildings

Master programme Advanced Energy Solutions

Code ENG3068

Thesis supervisor Professor Risto Kosonen

Thesis advisor(s) M.Sc. (Tech.) Olli Nummelin

Date 7.5.2020

Number of pages 80+5

Language Finnish

Abstract

HOLISDER is a project funded by EU Innovation and Research programme H2020. The project's objective is to enable holistic demand response optimization in buildings and built environment by integrating energy management systems' intelligence. In the project, a wide range of mature technologies are brought together and integrated in an open, interoperable and secure data management framework that is estimated to reduce buildings' energy costs significantly.

In the HOLISDER project, the data management framework enabling holistic demand response optimization is validated through piloting in different types of buildings, where the Finland pilot sites are a shopping center, an office building and a residential multi-storey building. The research objective of this master's thesis is to support the HOLISDER project's objectives by determining the demand response potential for developed solutions in reducing residential multi-storey buildings' energy costs for Finland pilot sites.

The potential of demand response in buildings is determined by comparing energy consumption and energy costs of Finland pilot sites to their baseline prior to the demand response systems' deployment. In the determination of Finland pilot sites' baseline and final state energy consumption and energy costs, the EnerKey energy management systems' main measurement data of buildings' electricity and district heat consumption and public information of their current district heat and electricity tariffs are utilized.

The final state of Finland pilot sites has been determined only for the residential building since the explicit demand response system in the HOLISDER project is still in development phase. Demand response activities reduced the residential building's energy costs by 5,3 percent compared to its baseline. In addition to this, the residential building's electricity consumption was reduced by 7,0 percent and district heat consumption by 5,1 percent. The electricity peak demand of the residential building was also decreased by 14,6 percent and district heat peak demand by 13,4 percent.

Demand response has substantial potential for reducing buildings' energy costs. Moreover, demand response is well suited for balancing buildings' energy consumption and reducing electricity and district heat peak demand. However, the potential of demand response in buildings needs to be determined on a building-specific basis due to the buildings' different types of uses, occupancy rates, end-users, building automation systems, and district heat and electricity tariffs.

Keywords demand response, potential, residential multi-storey building, energy consumption, energy costs, HOLISDER

Alkusanat

Diplomityö on tehty Caverion Suomi Oy:n antamasta aiheesta. Caverion Suomi Oy on mukana EU:n innovaatio- ja tutkimusohjelman H2020 rahoittamassa HOLISDER-projektissa, jonka ensisijaisina tavoitteina on pienten ja keskisuurten rakennusten energiakustannuksien vähentäminen sekä kysyntäjoustopon yleistäminen Euroopassa nykyistä teknologiaa hyödyntämällä. Tämän diplomityön tarkoituksena on tukea HOLISDER-projektin tavoitteita määrittämällä kehitettyjen ratkaisujen kysyntäjoustopon potentiaali asuinke-rostalon energiakustannuksien vähentämisessä Suomen pilottikohteiden osalta.

Diplomityöni valvojana toimi Risto Kosonen, jota haluan kiittää erityisesti asiantuntevista neuvoista ja arvokkaasta palautteesta. Haluan kiittää yhtä lailla myös diplomityöni ohjaajaa Olli Nummelinia ajankohtaisen aiheen tarjoamisesta ja mahdollisuudesta osallistua HOLISDER-projektiin sekä muita kyseisessä projektissa mukana olleita Caverion Suomi Oy:n työntekijöitä. Lisäksi haluan antaa erityiskiitoksen Simo Tähtiselle, joka oli edesauttamassa kysyntäjoustoponjärjestelmien käyttöönottoa ja siten myös diplomityöni valmistumista. Tahdon kiittää lämpimästi myös läheisiäni saamastani tuesta ja kannustuksesta opintojeni aikana.

Espoo 7.5.2020

Santeri Rajala

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	
Abstract	
Alkusanat	
Sisällysluettelo	5
Merkinnät	6
Lyhenteet	7
1 Johdanto	8
1.1 Tutkimuksen tausta	9
1.2 Tutkimuksen tavoitteet	11
1.3 Tutkimuksen rajaukset	11
1.4 Työn rakenne	12
2 Energiamarkkinat Suomessa	13
2.1 Energiantuotanto ja -kulutus	14
2.2 Sähkömarkkinat	17
2.3 Sähkön hinnoittelu	20
2.4 Kaukolämmön hinnoittelu	22
3 Kysyntäjoustopotentialin mahdollisuudet	23
3.1 Sähkön kysyntäjousto	24
3.2 Kaukolämmön kysyntäjousto	26
3.3 Haasteet ja rajoitteet	27
3.4 Aikaisempia tutkimuksia	30
4 Kysyntäjoustopotentialin tutkiminen	33
4.1 Suomen pilottikohteet	34
4.2 Pilottikohteiden kuormat	38
4.3 Kuormien siirtorajoitteet	41
4.4 Kuormien ohjaus ja säätö	42
4.5 Mittauslaitteiden asennus	46
4.6 Energiankulutuksen mittaus	46
4.7 Energiakustannuksien laskenta	47
4.8 Sisäympäristön laadun varmistaminen	49
5 Tutkimustulokset	52
6 Pohdinta	59
7 Johtopäätökset	62
Lähdeluettelo	66
Liiteluettelo	80
Liite 1. Kaukolämmön vesivirtamaksut	
Liite 2. Asuinkerrostalon lähtötilanteen energiankulutus	
Liite 3. Asuinkerrostalon lopputilanteen energiankulutus	

Merkinnät

I_{cl}	$[(m^2K)/W]$	vaatetuksen lämmöneristävyys
M	$[W/m^2]$	aineenvaihdunnan taso
P	$[W]$	sähköteho
Q	$[Wh]$	kaukolämmön kulutus
T	$[h]$	tarkasteluajanjakso
T_a	$[°C]$	ilman lämpötila
T_{cl}	$[°C]$	vaatetuksen pintalämpötila
T_m	$[°C]$	kaukolämmön menoveden lämpötila
T_p	$[°C]$	kaukolämmön paluuveden lämpötila
T_r	$[°C]$	ympäröivien pintojen keskimääräinen säteilylämpötila
W	$[Wh]$	sähkönkulutus
W_e	$[W/m^2]$	ulkoinen työ
c_p	$[J/(kgK)]$	ominaislämpökapasiteetti
f_{cl}	$[-]$	vaatetuksen pinta-alan suhde paljaan ihon pinta-alaan
h_c	$[W/(m^2K)]$	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin
p_a	$[Pa]$	ilman vesihöyryn osapaine
q_v	$[m^3/s]$	tilavuusvirta
t	$[-]$	mittausajanjakso
t_{occ}	$[h]$	tilan i kokonaiskäyttöaika
$t_{CO_2}^i$	$[%]$	tilan i käyttöaika CO ₂ -tasoilla I - IV
t_I^i	$[h]$	tilan i käyttöaika CO ₂ -tason I vaihteluvälillä (< 800 ppm)
t_{II}^i	$[h]$	tilan i käyttöaika CO ₂ -tason II vaihteluvälillä (800 - 1000 ppm)
t_{III}^i	$[h]$	tilan i käyttöaika CO ₂ -tason III vaihteluvälillä (1000 - 1400 ppm)
t_{IV}^i	$[h]$	tilan i käyttöaika CO ₂ -tason IV vaihteluvälillä (> 1400 ppm)
v_a	$[m/s]$	ilman suhteellinen nopeus
Φ	$[W]$	lämmitysteho
Δt	$[h]$	mittausajanjakson pituus
ρ	$[kg/m^3]$	tiheys
φ	$[%]$	ilman suhteellinen kosteus

Lyhenteet

ADR	Automated Demand Response
BAC	Building Automation and Control
COP	Coefficient of Performance
CCS	Carbon Capture and Storage
DER	Distributed Energy Resources
DSS	Data Services Server
EED	Energy Efficiency Directive
EFI	Energy Flexibility Interface
EPBD	Energy Performance of Buildings Directive
ESB	Enterprise Service Bus
GDM	Global Demand Manager
GDPR	General Data Protection Regulation
H2020	Horizon 2020
IEC	International Electrotechnical Commission
JACE	Java Application Control Engine
KPI	Key Performance Indicator
LDM	Local Demand Manager
M2M	Machine to Machine
MET	Metabolic Equivalent of Task
MOM	Message Oriented Middleware
MPC	Model Predictive Control
OPC-UA	Open Platform Communications Unified Architecture
PMV	Predicted Mean Vote
PPD	Predicted Percentage Dissatisfied
PV	Photovoltaics
USEF	Universal Smart Energy Framework

1 Johdanto

Viimeisten vuosien aikana rakennusten energiankulutus on noussut suureksi puheenaiheeksi. Rakennusten energiankulutus on lisääntynyt kovaa vauhtia, minkä takia energiansäästöstrategiat ovat nousseet monien valtioiden energiapolitiikassa ensisijaisiksi [1]. Esimerkiksi EU:n energiapolitiikan yksi keskeisimmistä tavoitteista on rakennusten energiankulutuksen vähentäminen. Rakennusten osuus energiankulutuksesta on noin 40 prosenttia muodostaen samalla myös lähes 36 prosentin osuuden hiilidioksidipäästöistä EU:ssa. [2] EU:n rakennuskannasta noin 75 prosenttia on energiankulutukseltaan epätehokkaita, jolloin nykyisten rakennusten kunnostamisella voidaan saavuttaa merkittävä vähennys niiden energiankulutuksessa. [3] Perinteinen tapa vähentää rakennusten energiankulutusta on ollut rakennusten energiatehokkuuden parantaminen, missä rakennusten lämpöhäviöitä on pienennetty rakennuksen vaipan lämmöneristävyttä parantamalla. Rakennusten energiatehokkuuden parantaminen on edesauttanut samalla myös sekä kestävää kehitystä että ilmastonmuutoksen hillintää. [4]

Energiatehokkaan rakentamisen perustana on rakennuksen ja teknisten järjestelmien lämpöhäviöiden pienentäminen. Näin ollen rakenne- ja talotekniikan yhteensovittaminen on keskeisellä sijalla rakennuksen energiatehokkuuden kannalta. Lähes nollaenergiarakentaminen tuo rakenne- ja talotekniikalle kuitenkin entistä kovempia vaatimuksia tulevaisuudessa. Rakennusten teknisten järjestelmien osilta tullaan vaatimaan entistä tehokkaampaa tiedonsiirtoa ja parempaa toimivuutta kuin aikaisemmin. [5] Teknisten järjestelmien toimintaa ohjaavalla rakennusautomaatiolla pyritään ylläpitämään tavoitteiden mukaista sisäympäristöä samanaikaisesti rakennuksen energiankulutusta ja energiakustannuksia minimoimalla [6]. Rakennusautomaatiolla ja rakennuksen energiankulutuksen optimoinnilla on siis selvä mahdollisuus huomattaviin taloudellisiin kustannussäästöihin vuosittain.

Rakennusteknisten ratkaisujen lisäksi rakennusten energiatehokkuutta voidaan myös parantaa niiden energiankulutusta optimoimalla. Rakennusten energiakustannuksien minimoimiseksi on myös tehty jo lukuisia tutkimuksia, ja viime aikoina yhdeksi trendiksi on noussut kysyntäjousto. Kysyntäjousto mahdollistaa rakennusten energiakustannuksien pienentämisen siirtämällä energiankulutusta korkean kulutuksen ja hinnan tunneilta edullisempaan ajankohtaan [7]. Esimerkiksi sähkölämmitteisissä omakotitaloissa on arvioitu saavutettavan 5-10 prosentin vähennys vuotuisissa sähkölaskuissa [8]. Kysyntäjousto ei ole uusi konsepti, ja teknologia sen implementoimiseksi on ollut olemassa jo kauan. Keskeisenä jäljellä olevana teknisenä esteenä on kuitenkin ollut yhtenäisten standardien ja protokollien kehittäminen, jotta kaikki kysyntäjoustojärjestelmän osat olisivat harmonisoituja ja kykeneväisiä toimimaan tiedonsiirtoon muiden osien välillä. [9]

Globaali energiantuotanto perustuu ensisijaisesti hiilidioksidipäästöjä aiheuttavien fossiilisten polttoaineiden käyttöön. Energiantuotannossa ja -kulutuksessa tarvitaan maailmanlaajuisia toimenpiteitä, jotta ilmaston lämpeneminen pystytään pysäyttämään yleisesti hyvin vaarallisen lämpenemisen rajana pidetyn kahden celsiusasteen rajan alle. [10] Fossiilisiin polttoaineisiin perustuvien voimalaitosten alasajoa kompensoivien uusiutuvien energiantuotantotapojen, kuten aurinko- ja tuulivoiman tuotannon, säädettävyyden ei kuitenkaan ole yhtä yksinkertaista tai kannattavaa [11]. Uusiutuvien energianlähteiden käytön lisääntymisen myötä energiantuotanto tulee tulevaisuudessa myös vaihtelevaan sääolosuhteiden mukaan aiempaa enemmän [12]. Ilmastonmuutoksen torjumiseksi tapahtuva energiemarkkinoiden murros

kohti päästötöntä energiajärjestelmää ei tarkoita siis ainoastaan muutoksia energiantuotantotavoissa, vaan on vaikutettava vahvasti myös energiankulutukseen [13].

Sähköä ei pystytä nykytekniikalla vielä varastoimaan suuressa mittakaavassa, minkä takia sähköntuotannon ja -kulutuksen on oltava lähes koko ajan tasapainossa [14]. Sähkön kysynnän vaihdellessa tarvitaan sähköjärjestelmässä myös tietynlaista joustavuutta sähköverkon tehotasapainon ylläpitämiseksi [15]. Kysyntäjoustoja pidetään yhtenä ratkaisuvaihtoehtona kyseiseen ongelmaan. Kysyntäjoustolla voidaan muun muassa parantaa sähköjärjestelmien luotettavuutta, pienentää sähkön kuormitushuippuja sekä vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja kalliin huipputuotantokapasiteetin käyttöä [16]. Kysyntäjouston avulla pystytään tulevaisuudessa kattamaan myös yhä suurempi osuus sähkön kysynnästä uusiutuvilla energialähteillä [17].

Nykyään teollisuuden suurien sähkökuormien säädettävyyttä hyödynnetään jo useilla eri markkinapaikoilla mahdollistaen sähkön kysynnän nopean vähentämisen häiriötilanteissa [18]. Markkinapaikoille pääseminen edellyttää kuitenkin suuria tehoja ja kallista automaatiota, mikä rajoittaa erityisesti uusien toimijoiden mahdollisuuksia tehdä säätövoimalla kannattavaa liiketoimintaa. Suomessa on yli 570 000 sähkölämmitteistä rakennusta, joiden sähkönkulutus on suurempi kuin Suomen kaikkien ydinvoimaloiden yhteenlaskettu sähköntuotanto. Rakennusten sähkönkulutus ei kuitenkaan sovellu kokonaisuudessaan kysyntäjouston toteutukseen. Kysyntäjoustopiileä siitä huolimatta paljon hyödyntämätöntä potentiaalia. Tämän takia on tärkeää, että energiamarkkinoiden sisääntulon kynnystä alennetaan ja helpotetaan myös pienempien toimijoiden pääsyä mukaan säätösähkömarkkinoille. [19]

1.1 Tutkimuksen tausta

Yksi yhteiskunnallisista haasteista on entistä joustavamman kulutuksen toteuttaminen. Ilmastomuutoksen hillitseminen, häiriötön sähkönjakelu ja markkinaintegraatio Euroopassa asettavat myös uudenlaisia haasteita energiaverkoille. Energiajärjestelmien lisääntyvä älykkyys asettaa energiaverkoille, asiakasrajapinnalle ja toimijoiden väliselle yhteistyölle myös uusia tarpeita ja vaatimuksia. Tutkimus- ja kehitystyön kautta löydettävien uusien ratkaisujen käyttöönotto on lähes välttämättömyys uudentyyppisen älykkään verkkotoiminnan kehittämisessä. [20] Euroopan energia-alan vapauttamisen jälkeen on tapahtunut merkittävää kehitystä, minkä on voinut huomata lisääntyneenä kilpailuna, markkinoiden yhdyntymisenä, tukkuhintojen alenemisena sekä uusiutuvien energialähteiden käytön lisääntymisenä. Siitä huolimatta kuluttajille tarjottavat vaihtoehdot ja edut ovat jääneet rajallisiksi. [21]

HOLISDER on EU:n innovaatio- ja tutkimusohjelman H2020 rahoittama projekti, jonka tarkoituksena on kokonaisvaltaisen kysyntäjouston optimoinnin mahdollistaminen rakennuksissa ja asuinalueilla integroimalla energianhallintajärjestelmien älyä [22]. H2020-ohjelman tarkoituksena on tukea tämänkaltaisia projekteja suurien yhteiskunnallisten haasteiden ratkaisemiseksi kehittämällä ja käyttöönottamalla uusia teknologioita sekä innovaatioita vahvistaen samalla myös tieteellistä osaamista Euroopassa [23]. Kuvassa 1 on esitetty tunnus, jota kaikkien tukea saaneiden projektien on edellytetty käyttävän.



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme under grant agreement No 768614

Kuva 1. HOLISDER-projektin avustussopimustunnus [22].

HOLISDER-projektissa yhdistetään laaja valikoima kehittyneitä teknologioita sekä integroidaan ne avoimeen, yhteentoimivaan ja turvalliseen tiedonhallinnan viitekehykseen sisältäen työkaluja koko kysyntäjouaston arvoketjun tarpeisiin. Teknologioiden integroimisella varmistetaan rakennusten energianhallintajärjestelmien, energiaverkkojen ja laitteiden välinen yhteentoimivuus avoimen standardipohjaisen tietoliikenteen kautta. Tällä tavoin mahdollistetaan kuluttajien vaikutusmahdollisuuksien lisääntyminen ja muuttuminen aktiivisiksi markkinatoimijoiksi käyttöönottamalla erilaisia loppukäyttäjäsovelluksia, kuten esimerkiksi henkilökohtaista informatiivista laskutusta, kuormien ohjauksen aikataulutusta sekä ennakkoivaa kunnossapitoa, tukevia kysyntäjouaston toteutusmalleja. [24] HOLISDER-projektin tarkoituksena on luoda myös uusia liiketoimintamalleja kuluttajien energiamarkkinoille osallistumista helpottaville välittäjille ja kolmansille osapuolille, missä kuluttajien joustavuutta hyödynnetään mahdollisimman paljon rakennusten energiakustannuksien minimoimisen ja toimijoiden tulojen maksimoimisen kannalta [25].

HOLISDER-projektissa otetaan käyttöön kokonaisvaltaisen kysyntäjouaston optimoinnin mahdollistava viitekehys, jonka avulla on arvioitu saavutettavan noin 45 prosentin vähennys rakennusten energiakustannuksissa. Samalla pienistä ja keskisuurista rakennuksista on tarkoitus tehdä yhdessä optimoidun energianhallinnan kanssa merkittäviä edistäjiä energiaverkkojen tasapainottamisessa. [25] Avoin, yhteentoimiva ja turvallinen tiedonhallinnan viitekehys validoidaan projektissa pilotoinnin avulla neljässä eri EU-jäsenmaassa, joihin luokituu Suomen lisäksi myös Iso-Britannia, Kreikka ja Serbia. HOLISDER-pilottikohteissa on laajalti eroja, kuten esimerkiksi niiden energiankulutuksessa, käyttötarkoituksissa, teknisissä järjestelmissä ja sääolosuhteissa. Pilottikohteiden erilaisuus edesauttaa kysyntäjouaston potentiaalin arvioimista antaen samalla osviittaa myös eri rakennustyyppien soveltuvuudesta kysyntäjoukseen perustuvalle liiketoiminnalle. [26]

HOLISDER-projektin kehitystä ja arviointia ohjataan eri käyttötapauksien avulla. Käyttötapaukset on jaoteltu projektin liiketoimintaskenaarioiden mukaisesti erilaisiin kategorioihin, missä niiden tarkoituksena on toimia kehitettävien teknisten ja taloudellisten ratkaisujen perustana. Yhtenäisen arvioinnin mahdollistamiseksi käyttötapaukset on määritelty mahdollisimman yksityiskohtaisesti kaikille pilottikohteille soveltuvien yhteisten tekijöiden perusteella. [27] Käyttötapauksia testataan innovaatioympäristötoimintaan (Living Lab) osallistuvien sidosryhmien toimesta. Living Lab -innovaatioympäristössä voidaan jakaa kokemuksia ja vaihtaa käyttäjälähtöistä avointa innovointia. Kehittävien ratkaisujen käyttökelpoisuuden kannalta on tärkeää kiinnittää huomiota liiketoiminnan vaatimuksien lisäksi myös loppukäyttäjien tarpeisiin. Kehitettävien ratkaisujen käyttäjälähtöisyys on projektissa tarkoituksenaan toteuttaa kysyntäjouaston arvoketjuun liittyvien sidosryhmien mahdollisuudella osallistua pilottitoimintaan sekä tutkimus-, kehitys- ja innovaatiotoimintaan antamalla palautetta kehitetyistä ratkaisuista tai tarvittavista muutostoimenpiteistä oman arkensa kautta. [28]

Kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutuksien arvioimista varten on selvitettävä ainakin pilottikohteiden lähtö- ja lopputilanne, mutta myös mahdollinen väliarviointi saattaa olla tarpeellista. Kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutuksien arviointi suoritetaan vertailemalla pilottikohteiden lopputilanteita niiden lähtötilanteisiin nähden. HOLISDER-pilottikohteiden lähtötilanne määritetään projektin mittaus- ja todennussuunnitelman mukaisesti ennen pilotoinnin alkamista. Yhtenäisen ja vertailukelpoisen arvioinnin mahdollistamiseksi käytetään projektissa suorituskyky mittareita, joiden tarkoituksena on toimia pilottikohteiden lähtö- ja lopputilanteiden välisen vertailun perustana. [29]

1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoitteena on määrittää kysyntäjouaston potentiaali eri rakennustyyppien energiakustannuksien vähentämisessä. Rakennuksissa kysyntäjouaston tarkoituksena on energiankulutuksen siirtäminen korkean kulutuksen ja hinnan tunneilta edullisempaan ajankohtaan tai energiankulutuksen hetkellinen muuttaminen sähköverkon tehotasapainon hallinnan tarpeisiin. Kysyntäjouaston avulla pyritään rakennusten energiakustannuksia vähentämään mahdollisimman tehokkaasti vaikuttamatta kuitenkaan huomionarvoisesti loppukäyttäjien viihtyvyyteen. Kysyntäjouaston potentiaali rakennuksissa määritetään eri rakennustyypeissä kvantitatiivisesti projektin pilotoinnin aikana kvalitatiivisen tutkimuksen ohella.

Kysyntäjouaston potentiaali rakennuksissa määritetään vertailemalla Suomen pilottikohteiden energiankulutusta ja energiakustannuksia niiden lähtötilanteisiin nähden ennen kysyntäjouastojärjestelmien käyttöönottoa. Kysyntäjouaston potentiaalin määrittämiseksi rakennusten energiankulutusta mitataan riittävän suuruisella aikavälillä ja tarkkuudella etäluettavien energiamittareiden avulla. Suomen pilottikohteiden lähtö- ja lopputilanteiden energiankulutuksen ja energiakustannuksien määrittämisessä hyödynnetään rakennusten EnerKey-energianhallintajärjestelmistä saatavia sähkön ja kaukolämmön päämittaustietoja sekä julkista tietoa niiden nykyisistä kaukolämpö- ja sähkötariffeista.

Tämän tutkimuksen tavoitteiden saavuttamiseksi on tutkimuskysymykset muotoiltu seuraavallisiksi:

- *Mikä on kysyntäjouastolla saavutettu vähennys rakennuksen energiankulutuksessa ja energiakustannuksissa?*
- *Miten kysyntäjouastotoimenpiteiden suorittaminen vaikuttaa rakennuksen sisäilman laatuun ja lämpötilaan?*
- *Kuinka hyvin tutkimustulokset vastaavat HOLISDER-projektin tavoitearvoja?*

1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa tarkastellaan kysyntäjouaston teknistä toteuttamista sekä arvioidaan kysyntäjouastotoimenpiteiden vaikutuksia rakennusten energiankulutukseen ja energiakustannuksiin Suomen pilottikohteissa, joihin lukeutuu kauppakeskus, toimistorakennus ja asuinkerrostalo. Tutkimuksessa hyödynnetään muun muassa Mimmi Niemistön diplomityössä [30] jo tehtyä tutkimusta kysyntäjouaston mahdollisuuksista Suomen pilottikohteissa sekä selvitystä niiden sähkö- ja lämpökuormista. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on tukea HOLISDER-projektin tavoitteita määrittämällä kehitettyjen ratkaisujen kysyntäjouaston potentiaali eri rakennustyyppien energiakustannuksien vähentämisessä.

Kysyntäjouaston potentiaalin määrittämiseksi tarvitaan Suomen pilottikohteiden energiankulutuksista ja energiakustannuksista tietoa ennen ja jälkeen kysyntäjouastojärjestelmien käyttöönoton. Suomen pilottikohteiden lähtötilanteiden määrittämiseksi tarvittavan energiankulutuksen mittauksen päättyessä suoritetaan rakennuksissa uusien laitteiden asennus, kysyntäjouastojärjestelmien käyttöönotto ja niiden yhteentoimivuuden testaus. Kysyntäjouastojärjestelmien ja laitteiden yhteentoimivuuden varmistuessa rakennusten energiankulutuksen mittaus aloitetaan uudelleen kysyntäjouastotoimenpiteiden vaikutuksien arvioimiseksi.

Suomen pilottikohteiden lähtötilanne määritetään analysoimalla aluksi vuodenpituista tarkasteluajanjaksoa ennen kysyntäjouastojärjestelmien käyttöönottoa. Suomen pilottikohteiden

lopputilanne esitetään tutkimuksessa kuitenkin ainoastaan asuinkerrostalon osalta kauppa-keskuksessa ja toimistorakennuksessa käyttöönotettavan eksplisiittisen kysyntäjoustoprojektin ollessa vielä kehitysvaiheessa. HOLISDER-projektin kestäessä vuoden 2020 loppupuolelle asti sijoittuu tämän tutkimuksen ajankohta vasta pilotoinnin alkuvaiheeseen, minkä takia asuinkerrostalon energiankulutuksesta on kysyntäjoustoprojektin käyttöönoton jälkeen saatavilla vain hyvin rajallisesti mittaustietoa.

Kysyntäjoustoprojektin käyttöönoton jälkeen määriteltävää asuinkerrostalon lopputilannetta vertaillaan lähtötilanteen vastaavanlaiseen tarkasteluajanjaksoon nähden yhdenmukaisen vertailun suorittamiseksi. Näin ollen tämän tutkimuksen tuloksia voidaan käyttää tietynlaisena väliarviona kysyntäjoustoprojektin vaikutusten arvioimisessa ja kysyntäjoustoprojektin potentiaalin määrittämisessä. Tässä tutkimuksessa ei oteta kantaa projektin aikana aiheutuneisiin investointi- tai toteutuskustannuksiin, vaan tutkimuksen painopiste asetetaan enemmän kysyntäjoustoprojektin aiheuttamiin rakennuksen energiankulutuksen muutoksiin ja niistä muodostuviin taloudellisiin kustannussäästöihin.

1.4 Työn rakenne

Luvussa 2 tarkastellaan nykyisiä energiamarkkinoita Suomessa ja pohditaan niiden kehittymistä tulevaisuudessa. Luvussa tutkitaan Suomen energiantuotantoa ja energiankulutuksen jakautumista käyttökohteittain eri rakennustyypeissä. Luvussa käsitellään myös pohjoismaisten sähkömarkkinoiden rakennetta ja toimintaperiaatetta sekä perehdytään sähkön ja kaukolämmön hinnoitteluun Suomessa.

Luvussa 3 tutkitaan kysyntäjoustoprojektin konseptia teoriatasolla. Luvussa tarkastellaan sähkön ja kaukolämmön kysyntäjoustoprojektin avulla saavutettavia hyötyjä sekä selvitetään niiden yleistymisen haasteita ja rajoitteita. Lisäksi luvussa esitellään muutamia Suomessa aikaisemmin tehtyjä tutkimuksia sähkön ja kaukolämmön kysyntäjoustoprojektiin liittyen.

Luvussa 4 käsitellään tutkimusaineistoa ja -menetelmiä. Luvussa esitellään Suomen pilottikohteet sekä tarkastellaan niiden sähkö- ja lämpökuormia. Luvussa käydään läpi myös kuormien ohjauksen ja säädön toimintaperiaatteita sekä käsitellään menetelmiä pilottikohteiden energiankulutuksien mittaamiseksi ja energiakustannuksien laskemiseksi.

Luvussa 5 esitellään tutkimuksen tuloksia. Luvussa tarkastellaan pilottikohteiden lähtö- ja lopputilanteiden sähkön ja kaukolämmön kulutusta, sähkön ja kaukolämmön kuormituskuippuja sekä energiakustannuksia.

Luvussa 6 arvioidaan tutkimustuloksien luotettavuutta. Luvussa pohditaan myös tutkimusaineiston riittävyyden, tehtyjen rajoitusten, mittauslaitteiden tarkkuuden sekä mahdollisten virheiden vaikutuksia tutkimustuloksiin.

Luvussa 7 tehdään johtopäätöksiä tutkimustuloksien ja niiden pohjalta tehtyjen analyysien perusteella. Luvussa arvioidaan tutkimustuloksien merkitystä ja pohditaan niiden tärkeyttä myös laajemmasta näkökulmasta. Lisäksi luvussa annetaan suosituksia mahdollisille jatkokäyttökohteille ja lisäselvityksille.

2 Energiamarkkinat Suomessa

Ilmastomuutoksen hillitseminen, hajautettu energiantuotanto ja uusiutuviin energiantuotantomuotoihin siirtyminen muuttavat liiketoimintamalleja sekä asettavat uudenlaisia haasteita energiamarkkinoiden toiminnalle. Ilmastomuutoksen hillitsemiseen investoitaessa yhä enemmän on energiamarkkinoiden kehitystä pystyttävä toteuttamaan hallitusti ja taloudellisesti. Suomella on mahdollisuus profiloitua vientimarkkinoilla älykkäiden ja joustavien energijärjestelmien ja niihin liittyvien ratkaisujen huippuosaajaksi. Näihin mahdollisuuksiin kiinni tarttuminen edellyttää kuitenkin omien vahvuuksien tunnistamista ja systemaattista kehittämistä sekä markkinoiden esteiden purkamista. [31] Suomessa pitäisi kehityksen tueksi panostaa aiempaa enemmän tutkimukseen ja koulutukseen. Yhteiskunnan tuet ja rahoitus olisi myös suunnattava uuteen, vielä kehitysvaiheessa olevaan, teknologiaan sekä palveluihin. [32]

Energia- ja ilmastopoliittisista päätöksistä entistä suurempi osa tehdään EU:ssa. Tällöin suurin osa energiaan ja ilmastoon liittyvästä kansallisesta lainsäädännöstä pohjautuu EU-lainsäädäntöön. Energiamarkkinoiden toimivuus, kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen ja energian saatavuuden turvaaminen ovat nousseet EU:n toiminnan keskeisiksi painopisteiksi. [33] Esimerkiksi uusiutuviin energialähteisiin perustuva energiantuotanto on lisääntynyt viime vuosina kovaa vauhtia niin Suomessa kuin myös muualla Euroopassa voimakkaan poliittisen ohjauksen ja laajojen tukimekanismien ansiosta [34]. Globaaleja hiilidioksidipäästöjä pitäisi kuitenkin vähentää yli puolella vuoteen 2050 mennessä vuoden 1990 tasoon verrattuna, jotta maapallon keskilämpötila olisi mahdollista rajoittaa alle kahden celsiusasteen lämpenemiseen [35].

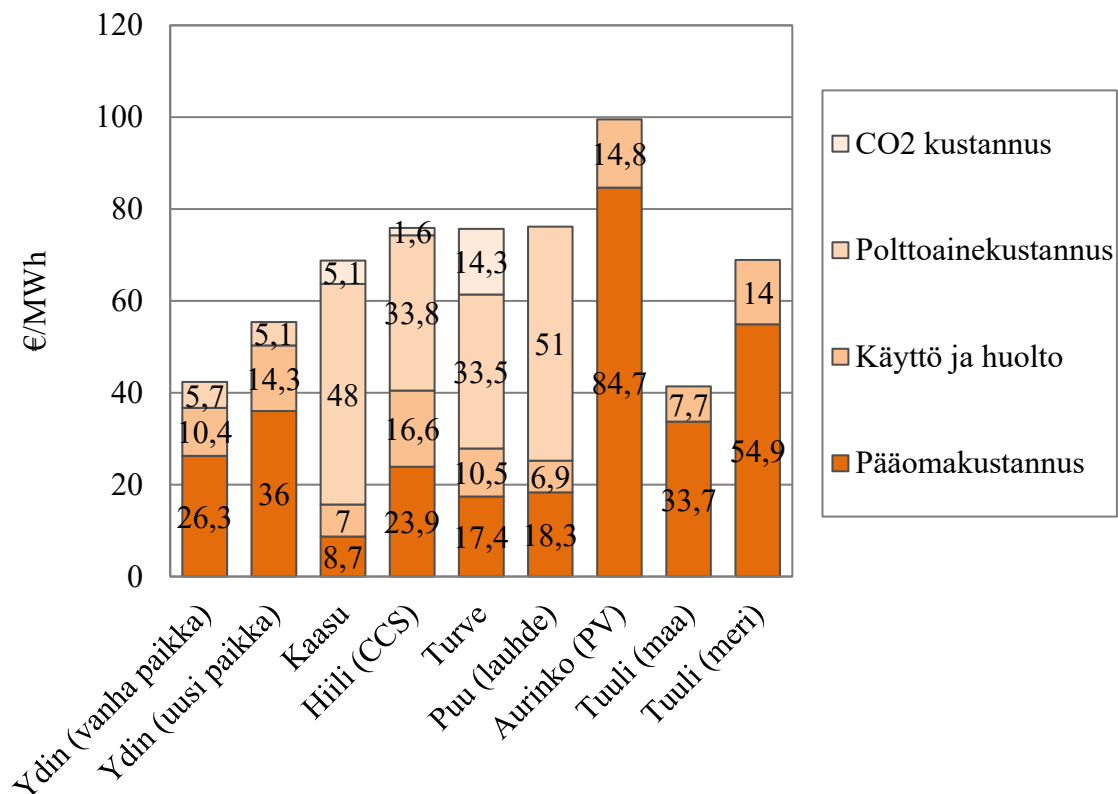
EU:n päästökauppajärjestelmä on EU:n ilmastopoliitiikan kulmakivi kasvihuonekaasupäästöjen kustannustehokkaassa vähentämisessä sekä maailman ensimmäinen ja laajin hiilidioksidimarkkina. Suomen kannalta erityisen tärkeitä EU:n päästökauppajärjestelmän piirissä olevia toimialoja ovat energia-alan lisäksi myös metsä-, metalli- ja kemianteollisuus. [36] EU:n päästökauppajärjestelmän tavoitteena on pienentää energiantuotannon ja teollisuuden kasvihuonekaasupäästöjä vähentämällä fossiilisten polttoaineiden käyttöä sekä lisäämällä uusiutuvien ja muiden päästöttömien energialähteiden käyttöä. EU:n päästökauppajärjestelmän suurin vaikutus sähkömarkkinoilla on ollut muiden kuin fossiilisten polttoaineiden käyttöön perustuvien sähköntuotantomuotojen kilpailukyvyyn parantaminen. Esimerkiksi fossiilisilla polttoaineilla toimivien voimalaitoksien omistajien on nykyään hankittava kasvihuonekaasupäästöjä vastaava määrä päästöoikeuksia, mikä lisää fossiilisilla polttoaineilla tuotetun sähkön tuotantokustannuksia. [37]

EU:n päästökauppa on jaoteltu eri vaiheisiin, joissa on sovellettu erilaisia toimintaperiaatteita, kuten päästöoikeuksien jakotavan ja absoluuttisten päästötavoitteiden muodossa. EU:n päästökauppaan kuuluvia kasvihuonekaasupäästöjä rajoitetaan asettamalla markkinoille laskettaville päästöoikeuksien määrälle absoluuttinen maksimi. Ilmaisjaon ja huutokaupan kautta toimijoille jaettavia päästöoikeuksia voidaan kaupata tai siirtää vuosien välillä. [36] Päästöoikeuksien hinta on toistaiseksi pysynyt melko alhaisena markkinoilla olevan ylitarjonnan takia, mikä on hillinnyt investointeja vähäpäästöisen energiantuotantokapasiteetin lisäämiseen. [38] EU:n päästökaupassa meneillään oleva kolmas vaihe päättyy vuonna 2020, minkä jälkeen alkaa vuoteen 2030 saakka kestävä neljäs vaihe [39]. Seuraavassa vaiheessa todennäköisesti kiristyvemmän päästökaupan myötä päästöoikeuksien hinta nousee ja vähäpäästöisen energiantuotannon kannattavuus parantuu entisestään [40].

2.1 Energiantuotanto ja -kulutus

Ilmastonmuutoksen hillitseminen, energian kysynnän kasvaminen ja fossiilisten energiavarojen ehtyminen tulevat ohjaamaan tulevaisuudessa energiaressurssien kysyntää ja energian hintoja. Energiansaannin varmistaminen on yksi keskeisistä päätöksentekoa ohjaavista tekijöistä niin valtakunnallisella kuin myös yritystasolla. Ydinpolttoaineressurssien on arvioitu riittävän nykyisillä käyttömäärillä sadoiksi vuosiksi, mutta samalla ydinvoimatuotannon on kuitenkin odotettu lisääntyvän tulevaisuudessa fossiilisten polttoaineiden korkean hinnan vuoksi. [41] Fossiilisten polttoaineiden, kuten öljyn, hiilen ja maakaasun, riittävyys on luonnollisesti riippuvainen käytettävissä olevista resursseista ja tulevaisuuden kysynnästä. Samoin kuin fossiilisten polttoaineiden myös energian kysyntä riippuu vahvasti väestön ja talouden kehityksestä. Fossiilisten polttoaineiden kysyntään vaikuttaa myös poliittinen ohjaus, vaihtoehtoisten teknologioiden käyttöönotto ja urbanisaatio. VTT:n suorittaman tutkimuksen mukaan öljyn ja maakaasun riittävyys maltillisesti kasvavalla kysynnällä on yli 40 vuotta, ja vastaavasti hiilen riittävyys yli 100 vuotta. [42] Fossiilisten polttoaineiden hinnat ovat nousseet edellisiin vuosiin verrattuna kiristyneen verotuksen ansiosta. Fossiilisten polttoaineiden kiristyneen verotuksen vaikutus on ollut huomattavissa siten myös kaukolämmön ja sähkön hintojen nousemisena. [43]

Lappeenrannan teknillisen yliopiston tekemässä tutkimuksessa vertailtiin eri energialähteiden sähkön tuotantokustannuksia Suomessa. Tutkimuksessa suoritettu vertailu oli mukana vain sähköä tuottavia voimalaitoksia, sillä sähkön ja lämmön yhteistuotantovoimalaitoksien kannattavuus perustuu ensisijaisesti lämmöntuotantoon ja siitä saatavaan hintaan. [44] Kuvassa 2 on esitetty tutkimuksessa selvitettyjen eri voimalaitostyyppien sähkön tuotantokustannuksia.



Kuva 2. Sähkön tuotantokustannukset Suomessa päästöoikeuden hinnalla 15 €/tCO₂ [44].

Suomen pitkän aikavälin tavoite on hiilineutraali yhteiskunta. Tavoitteeseen yltäminen on kuitenkin todellinen haaste energia-alalle, sillä Suomen kasvihuonekaasupäästöistä 80 prosenttia aiheutuu energiantuotannosta ja -kulutuksesta, mikäli siihen lasketaan mukaan myös liikenteen osuus. Hiilineutraalin yhteiskunnan saavuttaminen vaatii ennakoivaa ja pitkäjänteistä energia- ja ilmastopolitiikkaa, jolla mahdollistetaan investointien toteuttaminen, kasvihuonekaasupäästöjen vähentyminen, energiatehokkuuden parantaminen ja uusiutuvien energialähteiden osuuden kasvattaminen energiantuotannosta. [45] Hiilineutraalia yhteiskuntaa kohti siirryttäessä on energiajärjestelmän oltava: i) kustannustehokas sekä mahdollistettava kansantalouden kasvu ja suomalaisyritysten kilpailukyky globaaleilla markkinoilla, ii) kestävä kasvihuonekaasupäästöjen ja ympäristön näkökulmasta sekä iii) riittävän toimitusvarma. [46]

Suomella on tavoitteena vuoteen 2030 mennessä muun muassa kasvattaa energiaomavaraisuuttaan 55 prosenttiin, puolittaa tuontiöljyn kotimaan käyttö vuoden 2005 tasoon verrattuna ja luopua kivihiilen käytöstä kokonaan energiantuotannon hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Tuontiöljyn kotimaan käyttö jatkaa 2000-luvun alkupuolella alkanutta pienentymistä, ja kivihiili on vielä seuraavina vuosina tarpeellinen polttoaine erityisesti sähkön ja lämmön yhteistuotannossa hyvän varastoitavuuden ja edullisen hinnan vuoksi. [46] Lähi-vuosina poistuvan energiantuotantokapasiteetin korvaaminen vaatii kuitenkin monipuolisia ratkaisuja. Suomen tapauksessa yhtenä kannattavana vaihtoehtona voidaan pitää biomassan käytön lisäämistä muun uusiutuviin energialähteisiin perustuvan energiantuotannon ohella [47].

Energiatehokkuudella on merkittävä vaikutus rakennuksen energiankulutukseen. Rakennusten energiatehokkuuden parantamista ohjaava direktiivi EPBD (2018/844/EU) kohti nollaa-energiarakennuksia on tärkeä osa laajempia toimia, joilla pyritään yltämään EU:n energia- ja ilmastopolitiikan tavoitteisiin [48]. EU:n energia- ja ilmastopolitiikan vuoden 2020 tavoitteisiin sisältyy: i) kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 20 prosentilla vuoden 1990 tasoon verrattuna [49], ii) uusiutuvan energian osuuden kasvattaminen loppuenergiankulutuksesta 20 prosenttiin [50] sekä iii) energiatehokkuuden parantaminen 20 prosentilla vuonna 2007 arvioituun kehityspolkuun nähden [51]. Näiden lisäksi EU-jäsenmailla on myös omia kansallisia tavoitteita. Esimerkiksi Suomen tavoitteena on kasvattaa uusiutuvan energian osuus 38 prosenttiin loppuenergiankulutuksesta. [52] Suomi saavutti tavoitteensa kuitenkin jo viisi vuotta sitten uusiutuvan energian osuuden ollessa jo lähes 40 prosenttia loppuenergiankulutuksesta [53]. EU:n energia- ja ilmastopolitiikalla on myös vuodelle 2030 tavoitteita, joiden tarkoituksena on varmistaa oikeanlainen kehityssuunta kohti vuoden 2050 tavoitteita lähes täydellisestä päästöttömyydestä [54].

Suomessa energiankulutus asukasta kohden on erittäin korkea. Suomen korkea energiankulutus on seurausta muun muassa korkeasta elintasosta, kylmästä ilmastosta, suuresta valaistustarpeesta, pitkistä etäisyyksistä ja energiantensiivisestä teollisuudesta. [55] Suomessa rakennusten osuus energiankulutuksesta on suunnilleen 40 prosenttia ja kasvihuonekaasupäästöistä 30 prosenttia. Tämän takia Suomessa kiinnitetään erityistä huomiota rakennusten energiatehokkuuteen. [56] Rakennuksen käyttötarkoituksella on myös merkittävä vaikutus rakennuksen energiankulutukseen. Rakennusten energiankulutus jakautuu yleensä eri tavalla rakennustyyppien sekä uusien ja vanhojen rakennusten välillä. [57] Esimerkiksi uudemmissa rakennuksissa on energiankulutuksen suhde lämpimän käyttöveden valmistuksen ja tilojen lämmityksen välillä yleensä suurempi kuin vanhemmissa rakennuksissa. Taulukossa 1 on esitetty eri rakennustyyppien ostoenergiankulutuksen jakautumista käyttökohteittain.

Taulukko 1. Ostoenergiankulutuksen jakautuminen eri rakennustyypeissä [57].

Rakennus- tyyppi	Lämmitys ja ilmanvaihto [%]	Lämmin käyttövesi [%]	Valaistus ja sähkölaitteet [%]	Jäähdytys [%]	Muut [%]
Asuin- rakennus	62	22	16	-	-
Liike- rakennus	42	5	30	2	21
Toimisto- rakennus	47	4	35	3	11

Ihminen viettää noin 90 prosenttia ajastaan rakennusten sisätiloissa [58]. Ihmisten käyttäytyminen on yksi tärkeimmistä rakennusten energiankulutukseen vaikuttavista tekijöistä. Rakennusten energiankulutukseen vaikuttava ihmisten käyttäytyminen käsittää muun muassa termostaatin ja valaistuksen säätämisen, ikkunoiden avaamisen sekä LVI-järjestelmien kytkemisen päälle tai pois [59]. Ihmisten käyttäytyminen vaihtelee eri yksilöiden välillä, mikä johtaa huomattaviin vaihteluihin rakennusten energiankulutuksessa. [60] Esimerkiksi yhden celsiusasteen korotus rakennuksen sisäilman lämpötilassa vastaa jopa viiden prosentin lisäkustannuksia lämmitysenergiassa [61].

Rakennuksen sisäviihtyvyydellä on myös vaikutusta ihmisten käyttäytymiseen. Rakennuksen sisäviihtyvyys vaikuttaa muun muassa ihmisen terveyteen, moraaliin, työtehokkuuteen, tuottavuuteen ja tyytyväisyyteen [62]. Rakennusten energiankulutusta on myös mahdollista vähentää merkittävästi ihmisten käyttäytymiseen ja kulutustottumuksiin vaikuttamalla. Esimerkiksi rakennuksen energiankulutuksesta saatava reaaliaikainen palaute on tehokas työkalu hallitsemaan loppukäyttäjien energian käyttöä paremmin. [63] Reaaliaikaisen palautteen on arvioitu vähentävän sähkönkulutuksesta aiheutuvia kustannuksia lähes yhdeksällä prosentilla, mikä on huomattavasti parempi kuin yksityiskohtaisen laskutuksen tai internet-sivujen avulla saavutettava hyöty [64].

Suomessa on noin puolitoista miljoonaa rakennusta. Rakennuksista lähes 85 prosenttia koostuu asuinrakennuksista. Liike- ja toimistorakennusten osuus on yhteensä noin neljä prosenttia. Suomen nykyinen rakennuskanta muodostuu monilla eri vuosikymmenillä rakennetuista rakennuksista. Näin ollen rakennusten teknisissä järjestelmissä ja rakennusteknisissä ominaisuuksissa on huomattavia eroja. [65] Erityisesti 1960- ja 1970-luvun asuinrakennuksien energiankulutus on arvioitu olevan noin 20 prosenttia suurempaa kuin vuoden 2000 jälkeen rakennettujen asuinrakennuksien energiankulutus [66]. Rakennuksia suunniteltaessa ja rakennettaessa pitkäikäisiksi kestää niiden vaikutus Suomen energiankulutukseen ja kasvihuonekaasupäästöihin useita vuosikymmeniä [67].

Suomen rakennuskannan kehitystä, energiankulutusta ja rakennusten uudistuotannon määrän ennustamista on käsitelty useissa eri tutkimuksissa. Suomessa rakennusten uudistuotannon määrään vaikuttaa muun muassa väestönkasvu, väestön rakenne, maan sisäinen muutto, maahanmuutto, tilojen käytön tehokkuus ja vanhojen rakennusten poistuma. [68, 69] Suomen rakennuskannan energiankulutuksen on ennakoitu vähentyvän 13 prosentilla nykyisillä politiikkatoimilla rakennuskannan 38 prosentin kasvusta huolimatta vuoteen 2050 mennessä. Rakennusten energiankulutuksen vähentymisen on arvioitu johtuvan vanhaa raken-

nuskantaa energiatehokkaammasta uudistuotannosta, vanhojen rakennusten poistumasta ja korjauksista sekä lämmitystapojen muutoksista [70].

2.2 Sähkömarkkinat

EU:n tavoitteena on eurooppalaisten sähkön sisämarkkinoiden luominen. Sähkömarkkinoiden uudistusta ohjaavan direktiivin (2003/54/EY) voimin EU-jäsenmaiden sähkömarkkinoita on vapautettu kilpailulle asteittain viimeisten vuosikymmenien aikana [71]. Sähkömarkkinoiden vapauttaminen kilpailulle ja integrointi ovat olleet EU:n tavoitteina jo useita vuosia. Sähkömarkkinoilla avoimen kilpailun tarkoituksena on ollut palvelun laadun ja tuotetarjonnan parantaminen sekä asiakkaan sähkön käytöstä aiheutuvien kustannuksien pienentäminen. [72] Sähkömarkkinoiden integroimisessa on edelleen kuitenkin suuria haasteita muun muassa EU-jäsenmaiden poikkeavien markkinajärjestelyiden ja siirtoyhteykskapasiteettien riittämättömyyden takia [73]. EU:n sisäisten sähkömarkkinoiden luomiseksi tarvitaan yhtenäisiä sähkömarkkinasääntöjä ja markkinamalleja sekä riittäviä siirtoyhteykskapasiteetteja. Toimivilla sähkön sisämarkkinoilla ja hyvillä siirtoyhteyksillä vähennetään energian saatavuuskriisien uhkaa sekä tehostetaan energiantuotantoresurssien käyttöä. Sähkön sisämarkkinoiden avulla helpotetaan samalla myös uusiutuvan energian mukaantuloa markkinoille. [74]

Suomi on kuormitushuippujen aikana riippuvainen sähkön tuonnista. Sähkötalon riittävyys varmistetaan pohjoismaisten sähkömarkkinoiden avulla, missä Suomi on yksi osallistujamaista. Pohjoismaiden yhteisillä sähkön tukkumarkkinoilla kauppaa käydään Nord Pool -sähköpörssissä. Nord Poolissa on kolme keskeistä markkina-aluea: i) Elspot-, ii) Elbas- ja iii) johdannaismarkkinat. Elspot-markkinoilla sähkölle muodostetaan systeemihinta seuraavan päivän jokaiselle käyttötunnille osto- ja myyntitarjousten perusteella. Sähköntuotanto ja -kulutus pysyvät harvoin kuitenkaan ennustetussa. Elspot-markkinoiden sulkeuduttua edeltävänä päivänä klo 13 Suomen aikaa tilannetta korjataan tarvittaessa kutakin käyttötuntia edeltävälle tunnille asti jatkuvilla Elbas-markkinoilla. [75] Johdannaismarkkinoilla käydään kauppaa sähkön hintaan liittyvillä johdannaistuotteilla, kuten futuureilla, forwardeilla ja optioilla. Johdannaistuotteet ovat finanssisopimuksia, joiden tarkoituksena on suojautua sähkön systeemihinnan muutoksia vastaan. [76]

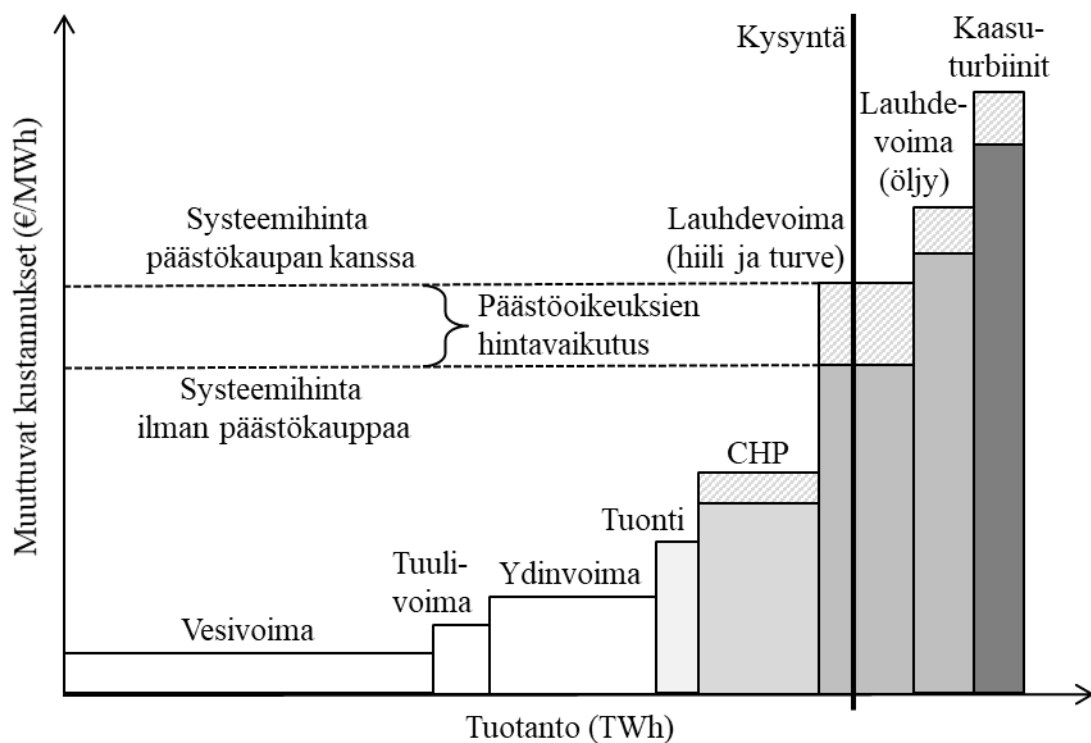
Sähköntuotannon ja -kulutuksen tasapainoa kuvaa sähköverkon taajuus, joka on tasapainotilassa 50 Hz. Käyttötunnin aikaisten poikkeamien varalta sähköntuotannon ja -kulutuksen tasapainottamisessa tarvitaan reservejä, kuten tehoaan tarpeen mukaan joko lisääviä tai vähentäviä voimalaitoksia ja kulutuskohhteita. Sähköverkon tehotasapainon hallintaan käytettäviä reservejä jaotellaan niiden käyttötarkoituksen mukaan kolmeen eri ryhmään: i) taajuuden vakautusreserveihin, joita käytetään sähköverkon taajuuden jatkuvaan hallintaan, ii) taajuuden palautusreserveihin, joiden tarkoituksena on sähköverkon taajuuden palauttaminen takaisin normaalialueelle (49,9 - 50,1 Hz) sekä aktivoituneiden taajuuden vakautusreservien vapauttaminen takaisin käyttöön ja iii) korvaaviin reserveihin, joilla valmistaudutaan häiriötilanteiden jälkeisiin mahdollisiin uusiin vikatilanteisiin palauttaen aikaisemmin aktivoituneita taajuuden palautusreservejä takaisin valmiustilaan. [77]

Sähkön kysyntäjoustolla voidaan osallistua samoihin markkinapaikkoihin kuin energiantuotantoresursseilla. Markkinapaikoilla on kuitenkin erilaisia teknisiä vaatimuksia, kuten esimerkiksi minimitarjouskoossa ja kuormien aktivoitumistavoissa. [78] Taulukossa 2 on esitetty markkinapaikkojen edellyttämiä minimitarjouskokoja ja sähkön kysyntäjouston nykyistä tilannetta Suomessa.

Taulukko 2. Markkinapaikkojen edellyttämä minimitarjouskoko ja sähkön kysyntäjouaston nykyinen tilanne Suomessa vuonna 2018 [78, 79].

Markkinapaikka	Minimitarjouskoko [MW]	Kysyntäjouaston kapasiteetti [MW]
Taajuusohjattu käyttöreservi	0,1	4
Taajuusohjattu häiriöreservi	1	430
Automaattinen taajuudenhallintareservi	5	-
Säätösähkö- ja säätökapasiteettimarkkinat	5	100 - 300
Elspot-markkinat	0,1	200 - 600
Elbas-markkinat	0,1	0 - 200
Tehoreservi	10	22

Sähkön systeemihinta muodostuu kysyntä- ja tarjontakäyrien leikkauspisteessä. Nord Pool määrittää sähkömarkkinaosapuolien tuntikohtaisten määrä- ja hintatarjousten perusteella kysynnän ja tarjonnan tasapainottavan sähkön systeemihinnan. Sähkön systeemihinta on yhtenäinen koko Nord Pool -alueella, mikäli tarjousalueiden välinen siirtoyhteyden kapasiteetti ei rajoita sähkömarkkinoiden toimintaa. Siirtoyhteyden kapasiteetin riittämättömyys kuitenkin estää todellisuudessa usein sähkön systeemihinnan yhdenmukaisuuden muodostumisen, minkä takia sähkön systeemihinta vaihtelee eri tarjousalueiden välillä. [80] Kuvassa 3 on esitetty sähkön tuotantorakennetta ja sähkön systeemihinnan muodostumista Nord Poolissa.

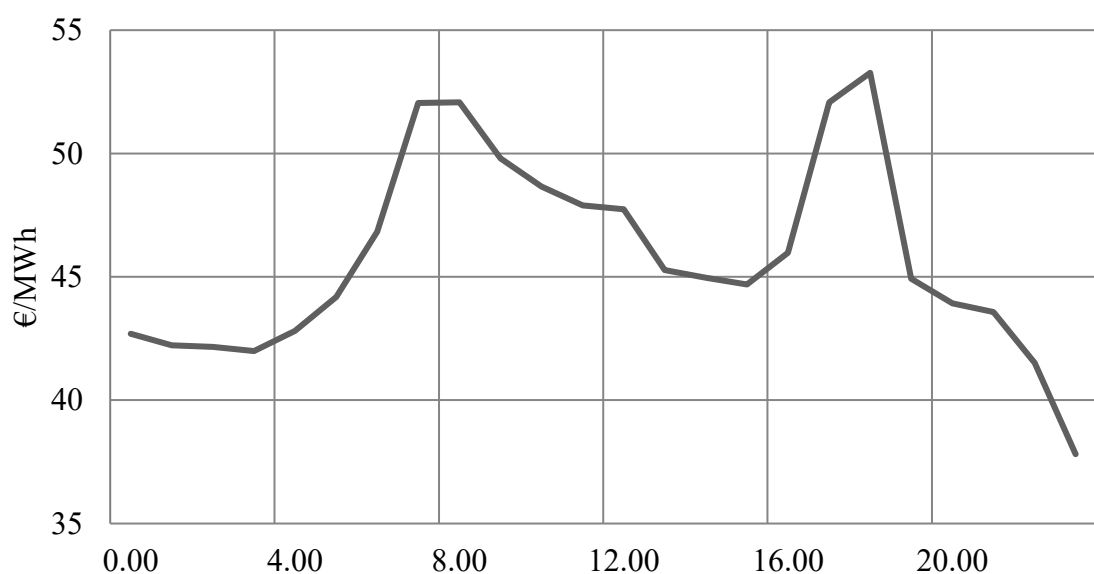


Kuva 3. Sähkön tuotantorakenne ja sähkön systeemihinnan muodostuminen Nord Poolissa [81].

Sähkön tuotantorakenteessa eri tuotantomuotoja otetaan käyttöön niiden muuttuvien kustannuksien mukaisessa järjestyksessä, missä muuttuvilta kustannuksiltaan alhaisimpia tuotantomuotoja käytetään ensin niin pitkään kuin vain niiden olemassa oleva tuotantokapasiteetti riittää. Tämän jälkeen sähkön tuotantorakenteessa siirrytään yhä kalliimpiin tuotantomuotoihin, kunnes tuotanto vastaa kysyntää. [80] Tuotantomuotojen muuttuviin kustannuksiin vaikuttaa muun muassa polttoaineen hinnan ja voimalaitoksen muiden käyttökustannuksien lisäksi myös päästöoikeuksien hinta ja voimalaitoksen säädettävyys [82].

Uusiutuvalla energiantuotannolla, kuten vesi- ja tuulivoimalla, on suhteellisen korkeita kiinteitä kustannuksia, mutta hyvin matalia muuttuvia kustannuksia muihin tuotantomuotoihin verrattuna. Esimerkiksi tuulivoimalaitoksissa maksaa lähinnä vain niiden rakennusvaiheessa jo pääosin maksettava teknologia. Polttoaineen ollessa ilmaista tai muuten edullista on voimalaitoksia kannattavaa käyttää niiden eliniän aikana niin paljon kuin mahdollista teknologian korkeiden alkupääomakustannuksien kuolettamiseksi. Kalliimpien polttoaineiden, kuten kaasun ja öljyn, käyttöön perustuvia voimalaitoksia pidetään periaatteessa vain silloin päällä, kun sähkön systeemihinta riittää kattamaan voimalaitoksen käyttökustannuksia tarpeeksi. [82]

Suomessa ja muualla Euroopassa tuulivoiman tuotantokapasiteetti kasvaa vauhdilla. Sähkömarkkinoilla sähkön systeemihinta alenee keskimäärin lisääntyvän tuulivoiman tuotantokapasiteetin vaikutuksesta, mutta samalla sähkön systeemihinnan vaihtelusta tulee aiempaa voimakkaampaa ja vaikeampaa ennustaa heikentäen koko tuotantokapasiteetin kannattavuutta. Esimerkiksi huipputuotantokapasiteetin on korotettava tarjoushintojaan kompensoidakseen pienentyneistä tuotantomääristä aiheutuneita menetettyjä tuottoja. Tuulivoima tuotannon vaihtelevan luonteen myötä säädettäviä voimalaitoksia joudutaan lisäksi käynnistämään ja sulkemaan entistä tiheämmin, mikä lisää niiden käyttökustannuksia ja siten myös huippukuormituksen aikaista sähkön systeemihintaa. Sähkömarkkinoilta myös poistuu tuotantokapasiteettia voimalaitoksien käyttöasteiden pienentyessä, millä katetaan erityisesti sähkön ja lämmön yhteistuotanto- sekä lauhdevoimalaitoksien tuotannon ja ylläpidon kustannuksia. [82] Kuvassa 4 on esitetty sähkön aluehinnan vaihtelua Suomessa yhden vuorokauden aikana Elspot-markkinoilla.



Kuva 4. Sähkön aluehinnan vaihtelu vuorokauden aikana Suomessa 12.3.2019 [83].

Suomen nykyinen taseselvitysjakso on 60 minuuttia. EU-lainsäädäntö velvoittaa Suomea ja muita EU-jäsenmaita tosin siirtymään vuoden 2020 loppuun mennessä lyhyempään, 15 minuutin, taseselvitysjaksoon. Pohjoismaisten kantaverkkoyhtiöiden tavoitteena on siirtymän toteuttaminen samanaikaisesti. Samassa yhteydessä pohjoismaisten sähkömarkkinoiden markkinapaikoista Elbas- ja säätösähkömarkkinoilla siirrytään 15 minuutin kaupankäyntijaksoon. [84] Siirtymisen taustalla on sähkömarkkinoiden taseselvitysjakson yhtenäistäminen EU-alueella, sillä EU-jäsenmailla on käytössä nykyään eripituisia, 15, 30 ja 60 minuutin, taseselvitysjaksoja. Korkeamman aikaresoluution avulla pienennetään taseselvitysjaksojen tasevirheitä, parannetaan sähköverkon taajuuden laatua, helpotetaan säätösähkömarkkinoille osallistumista ja tehostetaan rajasiirtoyhteyksien käyttöä. [85]

Suomessa etämittaus toteutetaan 60 minuutin mittausajanjaksoon perustuen. Etämitattavien mittauspisteiden tunnitainen energiankulutus- tai energiantuotantotieto toimitetaan asiakkaalle, markkinaosapuolille ja taseselvitykseen mahdollistaen ehjän toimitus- ja todentamisketjun sähkön tukkumarkkinoilta kaikkiin tuntimitattaviin sähkön loppukäyttäjiin asti. Lyhyempään taseselvitysjaksoon siirryttäessä nykyisten energiamittareiden mittausajanjakso on muutettava samalla 15 minuuttiin. Energiamittareista osa pystytään kuitenkin etäohjelmoimaan toimimaan vartissa, mutta osa energiamittareista joudutaan vaihtamaan kokonaan uusiin. [86] Energiamittareiden vaihtoon nähden on uudelleenohjelmointi etäyhteydellä huomattavasti nopeampaa, mutta ongelmana on joka tapauksessa varttimittausta varten edellytettävä muistikapasiteetti ja datansiirtonopeus. Keskeinen osa ratkaisua on myös datahubin käyttö tulevaisuudessa, minkä toimesta tuntimitattavia energiankulutuksia voidaan jakaa varttitaseisiin niissä kohteissa, joissa ei siirrytä vielä etupainotteisesti varttimittauksiin. [87]

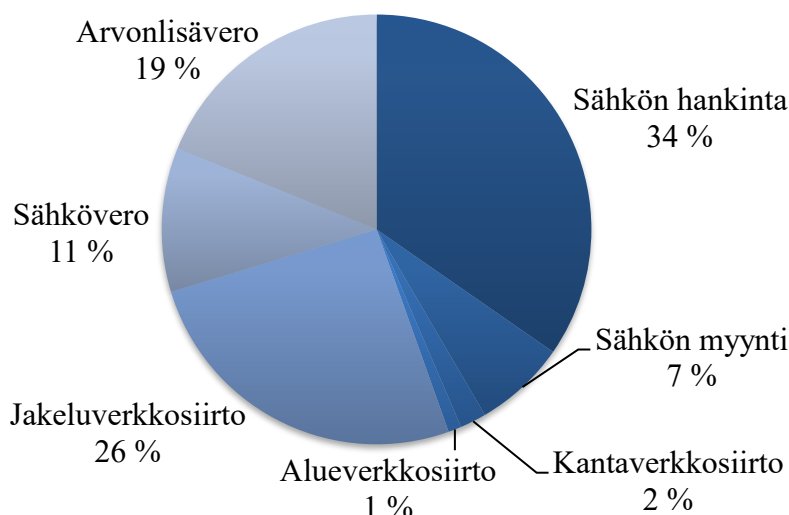
2.3 Sähkön hinnoittelu

Sähkömarkkinat muodostuvat sähkön tuotannosta, siirrosta, jakelusta ja myynnistä. Näistä siirto- ja jakeluverkkotoiminta ovat Suomessa luonnollisia monopoleja. [88] Sähköverkkotoiminta on luonteeltaan luonnollinen monopoli, sillä päällekkäisiä tai ristikkäisiä sähköverkkoja ei ole taloudellisesti kannattavaa rakentaa. Luonnollisen monopoliaseman omaava sähköverkkoyhtiö ei kohtaa suoranaista kilpailua, minkä takia sillä ei ole markkinoilta tulevaa painetta tehostaa liiketoimintaansa tai pitää hintojaan alhaisina. Suomessa paikallisen sähköverkkoyhtiön monopoliaseman väärinkäyttöä ehkäistään kuitenkin sähkömarkkinalain (588/2013) avulla. [89] Sähkömarkkinalain tarkoituksena on muun muassa varmistaa sähkön hyvä toimitusvarmuus ja kilpailukykyinen hinta [90]. Sähkömarkkinalaissa ei toisaalta määritellä tarkemmin sähkön hinnoittelun kohtuullisuutta. Suomessa sähkön hinnoittelun kohtuullisuutta arvioi Energiavirasto. Sähköverkkopalveluista ansaittu tulo saa kattaa sähköverkon ylläpidon, käytön ja rakentamisen kustannuksia sekä antaa sijoitetulle pääomalle kohtuulliseksi katsottavaa tuottoa. [89]

Sähkön hinta koostuu kolmesta eri kokonaisuudesta: i) sähkön energiamaksusta, ii) sähkön siirtomaksusta sekä iii) arvonlisä- ja sähköverosta. Sähkön energiamaksu muodostuu sähkön hankinta- ja myyntikustannuksista. Sähkön energiamaksusta suurin osa koostuu kuitenkin sähkön hankintakustannuksista, jotka määräytyvät joko sähköyhtiön oman tuotannon arvon tai sähkömarkkinoilta ostettavan sähkön systeemihinnan perusteella. [91] Sähkön myyntikustannuksiin sisältyy tavallisia myynnin ja markkinoinnin kustannuksia, kuten esimerkiksi laskutuksesta ja asiakaspalvelusta muodostuvia kustannuksia. Sähkön siirtomaksulla kateetaan sähköyhtiön verkkotoimintaan liittyviä palveluita, missä kustannuksia aiheutuu muun muassa sähköverkon ylläpidosta, kehittämisestä ja uudistamisesta. [92] Sähkön energia- ja siirtomaksua maksetaan käytetyn sähköenergian määrän mukaan. Näiden lisäksi on sähkö-

energiasta ja sähkönsiirrosta maksettava myös arvonlisäveroa sekä sähköveroa sähkön siirtomaksun yhteydessä. [93]

Asiakkaan kuukausittain maksama sähkölasku muodostuu sähköenergian ja sähkönsiirron kiinteistä perusmaksuista, sähkönkulutuksesta riippuvasta energia- ja siirtomaksusta sekä arvonlisä- ja sähköverosta. Asiakas maksaa käyttämästään sähköstä aina sopimuksen mukaisen hinnan sähkömarkkinoilla tapahtuvista lyhytaikaisista muutoksista huolimatta. Asiakkailla on mahdollisuus myös valita muita sähkötariffeja, kuten aika- ja tehotariffeja, joissa on erilainen sähkönkulutuksesta riippuva energia- ja siirtomaksu. [93] Kuvassa 5 on esitetty sähkön hinnan muodostuminen tyypillisessä kotitaloudessa.



Kuva 5. Sähkön hinnan muodostuminen tyypillisessä kotitaloudessa [91].

Nykyään useilla asiakkailla on käytössään omaa sähkön pientuotantoa. Sähkömarkkinalain mukaan sähkön pientuotantoa on kaikkien nimellistehoiltaan enintään 2 MVA voimalaitoksien sähköntuotanto [94]. Sähkön pientuotannon kannattavuuteen vaikuttaa muun muassa sähköverotus ja ylijäämänsähkön myyntihinta. Sähköverotuksen ulkopuolelle jää kuitenkin kaikkien nimellistehoiltaan alle 100 kVA voimalaitoksien sähköntuotanto. Sähkön pientuottajien ei tarvitse tällöin rekisteröityä verovelvollisiksi tai antaa sähköntuotannostaan veroilmoituksia. Nimellistehoiltaan yli 100 kVA voimalaitoksien on mahdollista myös pysyä sähköverotuksen ulkopuolella, mikäli niiden sähköntuotanto ei ylitä 800 MWh kalenterivuoden aikana. [95]

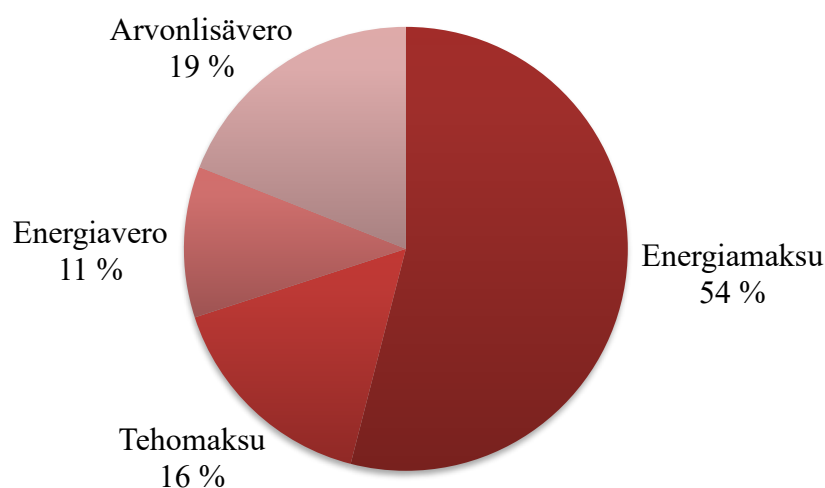
Sähkön pientuotannon ylittäessä kulutuksen on ylijäämänsähköä mahdollista myydä takaisin sähköverkkoon. Ylijäämänsähkön myyntiä varten on sähkön pientuottajilla oltava ensin kuitenkin sopimus sähkö- ja jakeluverkkoyhtiön kanssa. Sähköyhtiöissä ostosähkö hinnoitellaan yleensä tunneittain vaihtuvan sähkön systeemihinnan mukaan. Ylijäämänsähkön myynti takaisin sähköverkkoon saattaa pitää sisällään myös muita mahdollisia kuluja. Esimerkiksi sähköverkkoon syötetystä ylijäämänsähköstä on sähköyhtiöillä oikeus periä tietynsuuruinen myyntimarginaali ja jakeluverkkoyhtiöillä verkkopalvelumaksu, joka saa sähkömarkkinalain mukaan olla kuitenkin korkeintaan 0,07 c/kWh. Ylijäämänsähkön myynnistä saavutettava hyöty on yleensä kuitenkin sen verran alhainen, että järjestelmä kannattaa mitoittaa niin, että sähkö pystytään pääosin itse käyttämään. [96]

2.4 Kaukolämmön hinnoittelu

Suomessa kaukolämmön hinnoittelua ohjaa kilpailulainsäädäntö. Kilpailulain (2011/948) mukaan kaukolämmön hinnan on pääasiassa vastattava sen tuotantokustannuksia. Suomessa kaukolämmön hinnoittelun kohtuullisuutta arvioi Kilpailuvirasto. Kaukolämmön hintaa nostaa myös päästöoikeuksien hinta, sillä suurin osa Suomen kaukolämmön tuotannosta on EU:n päästökaupan piirissä. Kaukolämmön tuotanto on toisaalta saanut ilmaisia päästöoikeuksia, minkä takia päästöoikeuksien hinnan vaikutus kaukolämmön hintaan on toistaiseksi ollut varsin alhainen. Ilmaisten päästöoikeuksien jakamista asteittain rajoitettaessa on päästöoikeuksien hinnan vaikutuksen arvioitu kuitenkin kasvavan aiempaa suuremmaksi tulevaisuudessa. [97]

Kaukolämmön hinta muodostuu neljästä eri kokonaisuudesta: i) liittymismaksusta, ii) tehomaksusta, iii) energiamaksusta ja iv) arvonlisäverosta. Kaukolämmitykseen liittyttäessä maksetaan liittymismaksu, jonka suuruuteen vaikuttaa kiinteistön koko ja etäisyys lämpölaitoksesta. Liittymismaksulla katetaan muun muassa kaukolämpöverkon rakentamiseen liittyviä kustannuksia. Tehomaksu määräytyy asiakkaan tarvitseman lämmitystehontarpeen ja lämmönjakotavan perusteella. Energiamaksua maksetaan käytetyn kaukolämpöenergian määrän mukaan. [98] Energiamaksulla katetaan muun muassa polttoainekustannuksista ja muista kuluista, kuten päästökaupasta ja energiaverotuksesta, aiheutuvia kaukolämmön hankintakustannuksia. Näiden lisäksi on kaukolämmön liittymis-, teho-, ja energiamaksun yhteydessä maksettava myös arvonlisäveroa. [97]

Asiakkaan kuukausittain maksama kaukolämpölasku muodostuu kiinteästä perus- eli tehomaksusta, kaukolämmön kulutuksesta riippuvasta energiamaksusta ja arvonlisäverosta [97]. Kaukolämmön energiamaksu on yleensä kausihinnoiteltu. Esimerkiksi Suomessa on kaukolämmön energiamaksu kesäkaudella alhaisempi kuin talvikaudella, sillä kaukolämmön tuotanto on kesällä edullisempaa ja vähäpäästöisempää. [99] Kuvassa 6 on esitetty tyypillisessä asuinkerrostalossa käytettävän kaukolämmön hinnan muodostuminen.



Kuva 6. Kaukolämmön hinnan muodostuminen tyypillisessä asuinkerrostalossa [97].

3 Kysyntäjouaston mahdollisuudet

Globaalin energiamurroksen taustalla on yhteiskunnallinen tavoite energiantuotannon ja -käytön ympäristöhaittojen vähentämisessä. Yrityksissä hyödynnetään uusia liiketoimintamahdollisuuksia käyttöönottamalla entistä tehokkaampia ja ympäristöystävällisempiä toimintamalleja. Internetin ja uusien digitaalisten ratkaisujen toimiessa merkittävinä kehityksen katalyytteinä mahdollistetaan uusien toimintamallien käyttöönotto myös sähkömarkkinoilla. Sähkölaitteet ovat olleet tietokoneita lukuun ottamatta yhteyksissä yleensä vain sähköverkon kanssa. Nykyään esineiden internet mahdollistaa kaikenlaisten laitteiden liittämisen myös tietoverkkoon, jolloin ne pystyvät raportoimaan omasta kulutuksestaan sekä sallimaan oman kulutuksensa säätöä. [19]

Kysyntäjouaston kehitystä tukevien digitaalisten prosessien avulla mahdollistetaan sähkömarkkinoilla myös uusien osapuolien mukaantulo ja monipuolisempien palveluiden toteutus. Euroopassa on merkkejä jo tästä ilmiöstä. Esimerkiksi Saksan ja Ranskan sähkömarkkinoilla toimii jo itse ollenkaan sähköä tuottavia aggregaattoreita, jotka käyvät kauppaa edustamiensa loppukäyttäjien ohjattavilla kuormilla säätösähkömarkkinoilla. Uudenaikaisen teknologian hyödyntäminen on muuttanut useiden eri toimialojen lisäksi myös sähkömarkkinoita. Sähkömarkkinoiden nopea kehitys ja uudenlaiset toimintamallit muodostavat samalla kuitenkin tarpeen myös sähkömarkkinalainsäädännön kehittämiseksi. [19]

Yhteiskunta sähköistyy kovaa vauhtia. Sähköä hyödynnetään uusilla tavoilla, kuten esimerkiksi lämpöpumpuissa ja sähköautojen lataamisessa. Sähkönkulutuksen ja uusiutuvien energianlähteiden käytön lisääntyminen luo myös uusia haasteita sähköverkkoon. [19] Rakennuksissa on tavallisesti suuri sähkön kysyntä samanaikaisesti, mikä aiheuttaa sähköverkkoon kuormitushuippuja rasittaen niin sähköntuotantoon kuin myös sähköjakeluun käytettävää infrastruktuuria. Vuosittain rakennetaan lukuisia uusia voimalaitoksia, joiden tarkoituksena on ensisijaisesti kattaa kasvaneiden kuormitushuippujen aikainen sähkön kysyntä. Tämä kasvattaa sähkön tuotantokustannuksia entistä suuremmiksi ja heikentää voimalaitoksien kustannustehokkuutta kuormitushuippujen ulkopuolisena aikana. Kuormitushuippujen kasvu aiheuttaa myös taloudellisia ja kapasiteetillisia haasteita, mikä vaikeuttaa uusiutuvien ja hajautettujen energialähteiden integroimista sähköverkkoon. Tämän takia on erityisen tärkeää kehittää sellaista teknologiaa, jolla pyritään tasoittamaan kuormitushuippujen ja peruskuormituksen välisiä eroja. [100]

Energiamarkkinoita ja siirtoverkkoja sekä integroidaan että harmonisoidaan koko EU:n tasolla. Kehitys on voimakasta myös Suomessa ja muissa Pohjoismaissa. Yhteisten energiamarkkinoiden tarkoituksena on: i) tuoda vakautta, ii) mahdollistaa energiajärjestelmien tehokas käyttö ja iii) luoda edellytyksiä parhaiden käytäntöjen ja uusien toimintamallien leviämiseen Euroopassa. Kehittynyt teknologia tarjoaa myös rakennusten loppukäyttäjille uusia mahdollisuuksia osallistua energiamarkkinoille. Loppukäyttäjien merkitys korostuu, kun heidän roolinsa muuttuu rakennuksissa passiivisesta kuluttajasta aktiiviseksi markkinatoimijaksi. Rakennusten loppukäyttäjistä on tulossa olennainen osa energiajärjestelmää osallistumalla ohjauspalveluiden ja hinnoittelun kautta sähköverkon tehtäsapainon hallintaan ja resurssitehokkaan energiajärjestelmän kehittämiseen. Uudenlaisen energiajärjestelmän luotettavan toiminnan kannalta entistä tärkeämmässä asemassa tulevaisuudessa ovat muun muassa kysyntäjousto, rakennusten oma pientuotanto ja energian varastointi. [32]

3.1 Sähkön kysyntäjousto

Sähkön tuotantorakenne on siirtymässä tulevaisuudessa yhä enemmän uusiutuviin, ei joustaviin, energiamuotoihin. Lisääntyvän vaihtelevan energiantuotannon myötä pohjoismaisen sähköverkon tehtäsapaino alkaa muuttua entistä joustamattomaksi ja säästä riippuvaiseksi. Tulevaisuuden haasteisiin on pystyttävä vastaamaan joko säätämällä tuotantoa tai joustamalla kulutuksessa. Ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi uusiutuviin energialähteisiin perustuvan sähköntuotannon osuus kokonaistuotannosta kasvaa vauhdilla, jolloin sähköntuotantoa on entistä haastavampaa ajoittaa tarpeen mukaan korkean kulutuksen ajanhetkiin. Aikaisemmin on totuttu siihen, että sähköntuotanto mukautuu voimakkaasti vaihtelevan sähkönkulutuksen muutoksiin. Nykyinen kehitys on kuitenkin johtamassa sellaiseen tilanteeseen, jossa perinteisesti säädettävän tuotantokapasiteetin osuuden vähentyessä myös sähköjärjestelmän joustavuus vähenee. Tällöin sähkön saatavuuden vaihtelu näkyy suoraan sähkön hinnassa lisääntyvien ja kasvavien hintaheilahteluiden muodossa. Tämän takia sähkönkulutuksen on kannattavaa mukautua sähköntuotannon vaihteluihin tulevaisuudessa. [101]

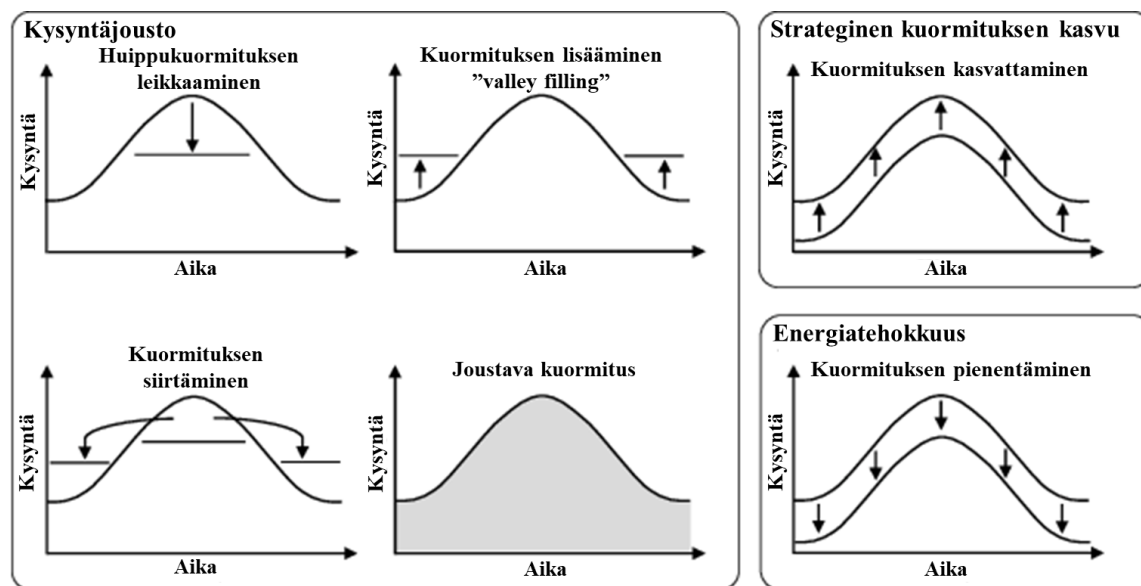
Sähkön käyttö ei ole täysin ennalta määrättyä, vaan siihen liittyy tietynlaista joustavuutta. Vaihtelevan energiantuotannon lisääntyessä ja säädettävän energiantuotannon vähentyessä tarve uusille joustaville ratkaisuille kasvaa. Käyttöhetkeä lähellä olevia tehotarpeen vaihteluja on entistä vaikeampi ennustaa, minkä takia joustavuuden tarve on siirtymässä koko ajan lähemmäksi käyttöhetkeä. [102] Sähköjärjestelmän kannalta edullisinta on saada sähkön käyttö ajallisesti mahdollisimman tasaiseksi. Sähkön kuormitushuippuja voidaan pienentää joko vähentämällä sähkönkulutusta kyseisellä ajankohdalla tai siirtämällä sähkönkulutusta toiseen ajankohtaan. Sähkön kuormitushuippujen pienentämisellä voidaan välttyä myös sähköjärjestelmän ylirajoitukselta. [18]

Sähkön kysyntäjouston avulla voidaan myötävaikuttaa kysynnän ja tarjonnan välisen tasapainon säilymiseen tiukoissa kuormitustilanteissa. Sähkön kysyntäjousto on yksi keskeisistä tekijöistä pohjoismaisten sähkömarkkinoiden toimivuuden kannalta, minkä takia sen edistäminen on priorisoitu korkealle kaikissa Pohjoismaissa. Kustannustehokkain ratkaisu muodostuu kuitenkin useiden eri ratkaisujen summasta. Sähköjärjestelmä tarvitsee myös muita joustavuuden lähteitä, kuten esimerkiksi säädettävää tuotantoa, riittäviä siirtoyhteyksiä sekä kustannustehokkaita akkuja ja sähkövarastoja. [18]

Sähkön kysyntäjouston ensisijaisina tavoitteina on tehostaa sähkömarkkinoiden toimintaa, parantaa nykyisen energiasäätelyn riittävyyttä sekä vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja investointien tarvetta huipputuotantokapasiteetin lisäämiseksi siirtämällä kulutusta pois korkean kysynnän ja hinnan ajanhetkiltä. Sähkön kysyntäjousto toimii samalla kustannustehokkaana energiaverkon tasapainotusvälineenä integroitaessa uusiutuvia energialähteitä kasvavissa määrin osaksi energiasäätelyä. [103] Näiden lisäksi sähkön kysyntäjoustolla pystytään vähentämään kalliin ja kovapäästöisen huipputuotantokapasiteetin käyttöä, mikä alentaa sähkön tuotantokustannuksia ja siten myös kuluttajien sähkön hintoja [104].

Sähkön kysyntäjoustoa voidaan hyödyntää useiden eri sidosryhmien toimesta sähkömarkkinoilla. Esimerkiksi sähkön kysyntäjouston avulla on jälleenmyyjien mahdollista suojautua sähkön systeemihintojen volatiliiteetilta ja jakeluverkonhaltijoiden välttyä turhilta sähköverkon lisäinvestoinneilta. Näiden lisäksi loppukäyttäjät pystyvät käyttämään kuormiensa joustavuutta pienentääkseen rakennuksen energiakustannuksia joko siirtämällä, vähentämällä tai joissakin tapauksissa hetkellisesti kasvattamalla sähkönkulutustaan vaihtelevia sähkön hintoja tai muita taloudellisia kannustimia hyödyntäen. [104]

Sähkön kysyntäjouston toteutusmallit perustuvat yleensä joko sähkön dynaamisiin hinnoittelumenetelmiin tai taloudellisiin kannustimiin. Toteutusmallit jaotellaan tyypillisesti sähkön käytön ohjausmenetelmän perusteella kahteen eri kategoriaan: i) eksplisiittiseen eli kannustinperusteiseen kysyntäjoustoon ja ii) implisiittiseen eli hintaperusteiseen kysyntäjoustoon. Toteutusmalleilla on vaikutusta erityisesti loppukäyttäjien tapaan hyötyä sähkön kysyntäjoustoon osallistumisesta. [105] Kuvassa 7 on esitetty erilaisten kysyntäjouston toteutusmallien jaottelua.



Kuva 7. Kysyntäjoustossa yleisimmin käytettävien toteutusmallien jaottelu [106].

Eksplisiittisessä kysyntäjoustossa loppukäyttäjän sähkön käyttöä ohjataan ulkoisen ohjauksen avulla, missä loppukäyttäjä ansaitsee erillisen korvauksen tehdyistä kysyntäjoustotoimenpiteistä. Eksplisiittisessä kysyntäjoustossa loppukäyttäjä osallistuu suoraan sähkömarkkinoille joko itsenäisesti tai aggregaattorin kautta. Aggregaattoreiden toimesta yksittäisten loppukäyttäjien ohjattavia kuormia pystytään yhdistämään yhdeksi suureksi aggregoiduksi kuormaksi, joka voidaan myydä sähkömarkkinoilla ylläpitämään sähköverkon luotettavuutta ja edistämään loppukäyttäjien osallistumista energiamaarkkinoilla. Eksplisiittinen kysyntäjousto tarjoaa arvokkaan ja luotettavan ohjausmenetelmän, jonka avulla jakeluverkonhaltijoiden on mahdollista ohjata kuormia sähköverkon operatiivisten ongelmien ratkaisemiseksi. [107]

Implisiittisen kysyntäjouston tarkoituksena on vaikuttaa loppukäyttäjän sähkön käyttöön ajasta riippuvien hintavaihteluiden perusteella, missä loppukäyttäjä muuttaa sähkönkulutustaan omien mahdollisuuksien ja rajoitusten mukaan energiakustannuksien minimoimiseksi [107]. Sähkömarkkinoiden kannalta kannattavimpana sähkön kysyntäjouston toteutusmallina pidetään implisiittiseen kysyntäjoustoon lukeutuvaa reaaliaikaista hinnoittelua, jossa sähkön hinta määräytyy käyttöaikaa vastaavan sähkön systeemihinnan mukaan. Muita implisiittisen kysyntäjouston toteutusmalleja ovat muun muassa kriittisen ajan hinnoittelu ja käyttöaikaan perustuva hinnoittelu. Käyttöaikaan perustuvassa hinnoittelussa sähköllä on käyttöajan mukaan ennalta määritetty hinta. [108] Esimerkiksi Suomessa on jo pitkään ollut käytössä yösähkö, jossa sähkön hinta on yöllä pienempi kuin päiväsaikaan.

Implisiittisessä ja eksplisiittisessä kysyntäjoustopaikassa edellytetään riittäviä tiedonsiirto- ja mitaustekniikoita, uudistettuja jälleenmyyjien laskutusmalleja sekä palautteen tai muun vastaavan viestintämenetelmän käyttöä loppukäyttäjien informointia varten. Eksplisiittisellä kysyntäjoustopaikalla ei ole nykyään samanlaista markkina-asemaa kuin implisiittisellä kysyntäjoustopaikalla, mutta kumpikin sähkön kysyntäjoustopaikan toteutusmalli on kuitenkin tarpeellinen loppukäyttäjien osallistumisen helpottamisessa sähkömarkkinoilla ja täysimääräisessä kuormien joustavuuden hyödyntämisessä. Loppukäyttäjillä on mahdollisuus valita joko vain toinen tai kumpikin sähkön kysyntäjoustopaikan toteutusmalli pystyäkseen hyötymään niiden molempien eduista. [107]

3.2 Kaukolämmön kysyntäjoustopaikka

Suomen yleisimpänä lämmitysmuotona on kaukolämpö. Kaukolämmön tuotanto on Suomessa väkilukuun suhteutettuna Pohjoismaiden suurinta, ja sitä pidetään yhtenä kustannustehokkaimpana tapana lämmittää rakennuksia kaupunkialueella. Kaukolämpöä tuotetaan yleensä sähkön ja lämmön yhteistuotantovoimalaitoksissa tai pelkissä lämmöntuotantovoimalaitoksissa. Kaukolämmön tuotantoon käytetystä polttoaineesta noin kolmasosa on puuta tai muita biomassoja. Kaukolämpöjärjestelmässä voidaan siirtyä käyttämään uusiutuvia energialähteitä laajamittaisemmin sitä mukaan, kun kaukolämmön tuotantoa muutetaan niihin perustuvaksi. Kaukolämmön uusina tuotantotapoina on yleistymässä kuitenkin muitakin kuin ainoastaan polttamiseen perustuvia ratkaisuja. Esimerkiksi teollisuuden ylijäämälämpöä ja jätevesien lämpöä hyödynnetään jo nykyään lämpöpumppujen avulla kaukolämpöksi. Kaukolämmön tuotannon uusina kehityssuuntina ovat muun muassa aurinkolämpö, kaksisuuntainen kaukolämpö, lämmön kausivarastointi ja perinteistä matalampien lämpötilatasojen hyödyntäminen. [109]

Kaukolämpöjärjestelmässä tarvittava teho tuotetaan yleensä lämmön kysynnän kausivaihteluiden takia vähintään kahdella erityyppisellä tuotantoyksiköllä, peruskuorma- ja huippukuormalaitoksilla, mikä on edullisinta kaukolämpöjärjestelmän luotettavuuden ja taloudellisuuden kannalta. Kaukolämpötoiminnan kannattavuus perustuu ensisijaisesti peruslämmön toimittamiseen ja peruskuormalaitoksien korkeaan käyttöasteeseen, käytettävyyteen sekä hyötysuhteeseen, sillä huippulämmön toimittaminen on usein tappiollista ja parhaimmillaan nollakatteista. Kaukolämpötoiminnan kannattavuutta pystytään parantamaan minimoimalla voimalaitoksien käynnistysten ja alasajojen määrää sekä maksimoimalla täydellä kuormalla ajettavaa käyntiaikaa. Näiden lisäksi kaukolämpötoiminnan kannattavuuteen voidaan myös vaikuttaa oikein mitoitetuilla tuotanto-, verkosto- ja asiakaslaitteilla sekä järkevillä polttoainevalinnoilla. [110]

Kaukolämmön kysyntäjoustopaikka perustuu lämmönkulutuksen parempaan hallintaan, lämpöenergian varastointiin ja hukkalämmön hyödyntämiseen. Kaukolämmön kysyntäjoustopaikassa rakennusten lämmitystehontarvetta pyritään vähentämään kuormitushuippujen aikana jakottamalla kulutusta ja varastoimalla lämpöä niin, että asiakkaiden kokemaa palvelun laatua ei heikennetä. [111] Kaukolämmön kysyntäjoustopaikan tavoitteena on pystyä hallitsemaan lämpökuormitusta koko kaukolämpöjärjestelmän tasolla yksittäisen lämmönvaihtojärjestelmän kulutuksen tasoittamisen sijaan [112].

Kaukolämmön kysyntäjoustopaikan potentiaali on riippuvainen kaukolämpöjärjestelmästä. Kysyntäjoustopaikan potentiaali koostuu pääasiallisesti alhaisemmista tuotantokustannuksista, vähentyvästä fossiilisten polttoaineiden käytöstä, lämmön ja sähkön yhteistuotannon kannattavuuden parantamisesta sekä huipputehon ja tuotantokapasiteetin tarpeen pienentymisestä.

[112] Kaukolämmön kysyntäjouaston potentiaali on korkea erityisesti kaukolämpöverkoissa, joissa perus- ja huipputuotannon hintaero on suuri ja tuotantolaitoksien mitoitus on tehty kuorman suhteen niukasti. Kysyntäjouaston potentiaali on ajallisesti korkeinta keväisin, syksyisin ja talvisin, kun vuorokauden sisäiset lämpötilaerot ovat suurimmillaan. [110]

Kaukolämmön kysyntäjouastoa ei pidä sekoittaa perinteisiin energiatehokkuustoimiin, energian säästöön tai energian kysynnän rajoituksiin. Kaukolämmön kysyntäjouastossa lämpöenergiaa ei välttämättä säästy, vaan tavoitteena on lämmönkulutuksen ajallinen siirtäminen koko kaukolämpöjärjestelmän kannalta optimaalisemmaksi. Esimerkiksi toimistorakennusten osalta kaukolämpöasiakkaita voidaan ohjata rakennusautomaation avulla käyttämään lämpöenergiaa yöaikana, missä lämpöä varastoimalla rakennukseen vähennetään lämpöenergian kysyntää aamulla kuormitushuipun aikana. Suuren rakennus- tai asiakasmassan hetkellisen kaukolämpötehon tarpeen ohjauksella voidaan mahdollistaa myös kaukolämmön tuottamiseen käytetyn energiantuotantokapasiteetin optimointi. [110]

Kaukolämpöjärjestelmä toimii kokonaisuutena olennaisesti pidemmällä aikavakiolla kuin sähköjärjestelmä. Lämmityksen vähentäminen tai lisääminen näkyy rakennuksen sisäilman lämpötilassa selkeällä viiveellä, mikä tekee kaukolämmön kysyntäjouaston hallinnasta haastavaa. Näin ollen kaukolämpöjärjestelmässä tarvitaan myös sähköjärjestelmän tavoin kulutuksen mukaan joustavaa tuotantorakennetta tai kysyntäjouaston kaltaisia ratkaisuja, joilla kulutuksen nopeisiin vaihteluihin pystytään vastaamaan. [110]

Kaukolämmön kysyntäjouaston avulla on uusia verkosto- ja tuotantoinvestointeja mahdollista lykätä tai toteuttaa kevyempinä. Kaukolämpöverkon kapasiteetin riittävyyden varmistaminen kysyntäjouastotoimenpiteillä saattaa olla toisinaan myös tarpeellista. Toimiva kaukolämmön kysyntäjouastojärjestelmä parantaa lämpökuormituksen ennustettavuutta vähentäen kapasiteetin tarvetta niin energiantuotannossa kuin myös kaukolämpöverkoissa. Sähkön ja lämmön yhteistuotannon optimaalinen ajoittaminen sähkön hinnan suhteen saattaa nousta myös entistä tärkeämmäksi tulevaisuudessa. [110]

3.3 Haasteet ja rajoitteet

Energian hintojen nousemisen odotetaan jatkuvan Euroopassa samalla kun EU-jäsenmaissa sitoudutaan korvaamaan halpoja ja hiilidioksidipäästöjä aiheuttavia fossiilisilla polttoaineilla toimivia tuotantolaitoksia vähäpäästöisillä ja uusiutuvilla vaihtoehdoilla. Kuormitushuippujen ennustetaan myös kasvavan, mikä rasittaa taloutta ja energiantuotantoon käytettävää infrastruktuuria. Näin ollen konkreettisia toimenpiteitä energiankulutuksen vähentämisessä tarvitaan entistä enemmän. Energiantuotantokapasiteetin lisääminen on kallis ratkaisu näiden haasteiden ratkaisemiseksi niin voimalaitoksien kuin myös muiden osapuolien kannalta. Kysyntäjouastoa pidetään kuitenkin ennakoivampana ja rakentavampana ratkaisuna kasvavien kuormitushuippujen asettamiin haasteisiin. Kysyntäjouasto on tehokas tapa vähentää kokonaisenergiankulutusta ja pienentää kuormitushuippuja. Kysyntäjouastolla edistetään samalla myös EU:n tavoitteita kohti kestävästä kehitystä sekä luotettavan ja kustannustehokkaan energiantuotannon lisäämistä. [113]

Kysyntäjouaston kehitystä tukee älykkäiden energiaverkkojen, energian varastointijärjestelmien sekä etäohjattavan tekniikan, kuten etäluettavien energiamittareiden ja kiinteistöautomaattioratkaisujen, kehittyminen [111]. Esimerkiksi älykkäitä energiamittareita pidetään yhtenä kustannustehokkaimpana tapana lisätä rakennusten loppukäyttäjien energiamarkkinoille osallistumista ja kysyntäjouastoon sitoutumista markkinoiden kannalta sopivalla taval-

la palautteen, dynaamisen hinnoittelun ja rakennusautomaation avulla [64]. Kysyntäjouaston täysimääräisen potentiaalin saavuttamiseksi ovat sen yleistymisen esteet kuitenkin purettava ensin. Kysyntäjouaston yleistymisen suurimmat haasteet liittyvät tekniikkaan, markkinoihin ja lainsäädäntöön. Kysyntäjouaston kehityksen edistämiseksi on kehitettävä toimiva markkinamalli ja standardoitu tiedonhallinnan viitekehys, parannettava kuluttajien tietoisuutta sekä toimeenpantava kysyntäjouaston käyttöönottoa entistä laajemmin mahdollistava lainsäädäntö kaikissa EU-jäsenmaissa. [114]

Euroopan energia-ala on viime vuosikymmenien aikana ollut muutosten kohteena. Energian vähittäismarkkinoilla ei muutoksessa olla kuitenkaan pysytty mukana. Euroopan komission visio energiamarkkinoiden uudesta markkinarakenteesta pyrkii vahvistamaan loppukäyttäjien asemaa liittämällä energian tukku- ja vähittäismarkkinat paremmin toisiinsa. Uusien ja innovatiivisten energiapalveluyrityksien on uutta tekniikkaa hyödyntämällä parannettava loppukäyttäjien mahdollisuutta osallistua täysimääräisesti energia-alan muutokseen, tarjottava energiatehokkaita ratkaisuja ja edistettävä yleistä energiankulutuksen vähentämistä. Energiaverkoissa ja rakennuksissa käytettävien älykkäiden teknisten ratkaisujen pitää yksinkertaistaa loppukäyttäjien osallistumista energiamarkkinoilla eikä luoda rasitteita. [115]

Integroiduilla ja automatisoiduilla ratkaisuilla voidaan yksinkertaistaa loppukäyttäjien toimia yhdistämällä älykkäitä mittausjärjestelmiä rakennuksen energianhallintajärjestelmiin ja älylaitteisiin. Näiden ratkaisujen avulla voidaan muun muassa hallita rakennuksen energiankulutusta, osallistua kysyntäjouastoon ja sovittaa rakennuksen energiankulutus mahdollisimman tarkasti vastaamaan omaa pientuotantoa energian hintatietojen perusteella. Kehittyneen mittausinfrastruktuurin käyttöönoton on myös varmistettava tekninen yhteentoimivuus ja loppukäyttäjien mahdollisuus hankkia energiankulutustietonsa avoimen standardiliitännän kautta. Standardit ja yhteentoimivuus ovat tärkeitä ominaisuuksia rakennusten energianhallintajärjestelmien ja älykkäiden laitteiden välisessä tietoliikenteessä, jotta laitteiden asentaminen ja käyttäminen on mahdollisimman helppoa. [115]

Rakennusten loppukäyttäjillä on täysi valinnanvapaus osallistua tai olla osallistumatta kysyntäjouastoon. Näin ollen rakennusten loppukäyttäjien ohjaaminen kohti aktiivista energiamarkkinoilla osallistujaa pitää tehdä vastuullisesti. Ideaalisesti loppukäyttäjät ovat tietoisia rakennusten eri teknisten järjestelmien toimintaperiaatteista ja riittävän motivoituneita suorittamaan aktiivisesti energiansäästötoimenpiteitä. Rakennusten tekniset järjestelmät suunnitellaan kuitenkin usein loppukäyttäjien näkökulmasta liian vaativiksi käyttää. Todellisuudessa loppukäyttäjät ymmärtävät rakennusten teknisten järjestelmien toimintaa puutteellisesti, minkä takia niitä käytetään rakennuksen energiankulutuksen kannalta epäoptimaalisesti. Loppukäyttäjien toiminnasta aiheutuvia haitallisia vaikutuksia voidaan kuitenkin vähentää robusteilla suunnitteluratkaisuilla, missä rakennusten teknisten järjestelmien epätarkoituksenmukaisella käytöllä tai loppukäyttäjien käyttäytymisellä ei ole niin suurta vaikutusta rakennuksen energiankulutukseen. [116]

Uusien teknologioiden kehittämisellä ja käyttöönottamisella voidaan parantaa rakennusten energiatehokkuutta. Uusien teknologioiden käyttöönotto ei yksin välttämättä takaa kuitenkaan vähäistä energiankulutusta rakennuksissa, sillä: i) ihmisten ja uusien teknologioiden välinen vuorovaikutus saattaa tehdä niiden omaksumisesta vaikeaa, ii) on olemassa mahdollisuus, jossa uusien teknologioiden käytön lisääntyminen päinvastoin kasvattaa rakennuksen energiankulutusta ja iii) uusien teknologioiden vaikutus rakennuksen energiankulutukseen

saattaa jäädä odotettua pienemmäksi, mikäli niitä ei suunnitella, toteuteta tai ylläpidetä asianmukaisella tavalla. [117]

Kaukolämmön kysyntäjoustop toteuttaminen on haastavaa. Kaukolämmön uudenaikaisissa tuotanto-, varastointi-, ja joustoratkaisuissa vaaditaan uusia investointeja sekä kaukolämpömarkkinoiden kehittämistä. Kaukolämpömarkkinoita pitää avata ulkopuolisille toimijoille regulaatiotoimin uusien toimijoiden saamiseksi mukaan kehittämään parempia kaukolämmön joustopalveluita ja -järjestelmiä. Kaukolämmön kysyntäjousto edellyttää myös taloudellisten kannustimien tarjoamista. Kaukolämpömarkkinoilla pitäisi siirtyä myös tuntipohjaiseen hinnoittelumalliin, jotta kaukolämmön kysyntäjousto tarjoaisi enemmän taloudellista hyötyä niin loppukäyttäjien kuin myös palveluoperaattoreiden näkökulmasta. [111]

Kysyntäjoustop ollessa tuntitaso asia myös hinnoittelun pitäisi tapahtua tuntitasolla, mikäli sillä halutaan olevan asianmukainen kannustinvaikutus. Kaukolämmön tuotantokustannuksia vastaavaa tuntipohjaista hinnoittelumallia pidetään toimivana kannustimena vähentää energiankulutusta kalliiden tuntien aikana, mikäli käytössä on ollut aikaisemmin sama hinta koko vuoden. Kaukolämmön kysyntäjoustop ohjaus pitäisi olla kaukolämpöyhtiöllä järjestelmätason hyötyjen ja niiden ennakoitavuuden maksimoinnin kannalta, missä toimintaperiaatteena on kaukolämpöyhtiön antama hintasignaali, jonka mukaan kysyntäjoustopjärjestelmään liittyneissä kiinteistöissä toteutetaan hetkellistä kaukolämpötehon tarvetta alentavia toimenpiteitä mahdollisimman ennakoitavalla ja asukkaiden kokeman palvelutason säilyttävällä tavalla. [110]

Suomessa taloudellisia kannustimia pidetään nykyään riittämättöminä siihen, että energiankulutusta vähennettäisiin proaktiivisesti rakennuksissa. Esimerkiksi asuinkerrostaloissa on totuttu mukaviin ja tasaisiin sisäilman lämpötiloihin sekä edulliseen ja loppukäyttäjän näkökulmasta ehkä jopa näennäisen ilmaiseen lämmitykseen, sillä lämmitysenergiankulutusta ei eritellä ollenkaan yhtiövastikkeessa tai vuokrassa. Asuinkerrostalon huoneistokohtaisella lämmitysenergian laskutuksella on lämmitysenergiankulutuksen arvioitu vähentyvän noin 20 prosentilla. Energiatohokkuusdirektiivi EED (2018/2002/EU) edellyttää kaikkia EU-jäsenmaita siirtymään asuinkerrostaloissa huoneistokohtaiseen lämmitysenergian laskutukseen, mikäli se vain on kustannustehokasta. VTT:n laskelmien perusteella sitä ei ole kuitenkaan pidetty Suomessa vielä kustannustehokkaana. Esimerkiksi huoneistokohtainen käyttöveden mittaus on jo muuttunut lakisääteiseksi uusissa (2011-) ja peruskorjattavissa (2013-) asuinkerrostaloissa. [118] Huoneistokohtaisen vedenmittauksen avulla on saavutettu asuinkerrostaloissa jopa 30 prosentin vähennys kokonaisvedenkulutuksessa sekä 9 prosentin vähennys lämmitysenergiankulutuksessa. [119]

Sähkön kysyntäjoustop täytyy olla taloudellisesti kannattavaa kaikkien sidosryhmien kannalta. Nykyään niin ei vielä ole, sillä suurin osa loppukäyttäjistä kuluttaa sähköä kiinteistöhintaisilla sähkösopimuksilla ilman kustannusseuraamuksia kuormitushuippujen aikana. Kulutuksessaan joustavat loppukäyttäjät saavat myös kovin vaatimattoman osan siitä taloudellisesta hyödystä, mikä kysyntäjoustop avulla saadaan koko sähköjärjestelmän tasolla. [120] Perinteisen säätökykyisen tuotantokapasiteetin osuuden vähentyessä ja vaihtelevan tuotantokapasiteetin kasvaessa voimakkaasti on sähkömarkkinamalli päivitettävä yhteensopivaksi uuden sähkön tuotantorakenteen kanssa niin, että sähköntuotannon ja -kulutuksen tasapainottaminen sujuisi luotettavasti markkinahintojen ohjaamana sekä energia- ja ilmastotavoitteet saavutettaisiin kustannustehokkaalla tavalla edullisen sähkön tarjonnan ohella [87].

Sähkön hinnoittelun pitää vastata enemmän sähköjärjestelmän todellisia kustannuksia. Hajautetun energiantuotannon ja kysyntäjoustotoimenpiteiden avulla saavutettavien sähköverkon kustannussäästöjen suhteen on hinnoittelun oltava kohtuullista ja kustannusvastaavaa. Jakeluverkonhaltijoiden on yritettävä edistää asiakkaiden tehokasta ja taloudellista sähkön käyttöä sekä sähkökuormien ohjausmahdollisuuksien hyödyntämistä, mikä edellyttää käytännöllisesti katsottuna nykyistä dynaamisempaa hinnoittelua ja teho- tai kapasiteettimaksuja. Sähkön siirron, sähköenergian ja sähköverojen hinnoittelumalleja olisi myös uudistettava toimialan ja päättäjien yhteistyöllä siten, että niillä edistetään sähkön kysyntäjoustoa, energia- ja tehotehokkuutta sekä uusiutuvaa energiantuotantoa. [120]

Rakentamisessa pitää energiatehokkuuden ohella tavoitella myös tehonhallintaa ja sähkön kysyntäjoustoa edistävää sähkösuunnittelua. Rakennusten sähkötehon tarvetta on erityisesti pyrittävä pienentämään nykyisestä tasosta. Esimerkiksi rajoittamalla laitteiden maksimitehoa voidaan niiden sähkötehon tarvetta pienentää, mutta tärkeämpää olisi yksittäisten laitteiden tehon rajoittamisen sijaan hallita rakennusten sähkötehon tarvetta ja sähkökuormien ohjausta kokonaisuutena. Näin ollen Suomen rakentamismääräyksiin tulisi sisällyttää myös sähkösuunnitteluvaatimus, jolla mahdollistettaisiin rakennusten tehonhallinta ja sähkökuormien ohjaus nykyistä helpommin. [120]

3.4 Aikaisempia tutkimuksia

Sähkön kysyntäjousto on nykyään jo tunnettu teknologia sähkömarkkinoilla. Sähkön kysyntäjoustoa on tutkittu useissa tutkimuksissa niin Suomessa kuin myös maailmanlaajuisesti. Teollisuusalalla, kuten teräs- ja paperiteollisuudessa, sähkön kysyntäjoustoa on hyödynnetty laajalti jo pitkään. Asunto- ja palvelualalla sähkön kysyntäjouaston potentiaali on myös korkea rakennusten lämmityksen, jäähdytyksen, kodinkoneiden ja sähköautojen latauksen osalta. Sähkön kysyntäjouaston toteuttaminen näillä markkina-alueilla on kuitenkin melko alhaisella tasolla lainsäädännön, markkinoiden ja tuotteiden suunnittelun vaikeuttaessa sitä useimmissa EU-jäsenmaissa. [114]

Suomessa sähkön kysyntäjouaston toteutuksesta on tähän asti vastannut ensisijaisesti teollisuus, jonka prosessien kuormaa on hyödynnetty sähköverkon tehotasapainon ylläpitämisessä. Sähkön kysyntäjouaston seuraavana potentiaalisena kehitysaskeleena pidetään kuluttajamarkkinoiden entistä vahvempaa kytkeytymistä sähkömarkkinoihin, missä yksittäisten loppukäyttäjien ohjattavista kuormista muodostettua yhtä suurempaa kokonaisuutta myydään kysyntäjouastomarkkinoilla. [121] Sähkön kysyntäjouaston toteuttamiseksi rakennuksissa pyritään hyödyntämään sellaisten laitteiden kuormia, joita voidaan ohjata aiheuttamatta loppukäyttäjille kohtuutonta haittaa. Esimerkiksi rakennuksessa olevan laiteryhmän, kuten varaavan lämmityksen, sulanapitolämmityksen ja kylmävaraston jäähdytyksen, käyttöaikaa on mahdollista siirtää vuorokauden aikana. Rakennuksen valaistuksen, ilmanvaihdon ja sähkökiukaiden tehoa voidaan myös hetkellisesti säätää pienemmäksi ilman asumismukavuuden tai sisäolosuhteiden heikentymistä. [122]

Fingrid ja There Corporation toteuttivat sähkön kysyntäjouastoon liittyvän tutkimus- ja tuotekehityshankkeen, jonka tavoitteena oli selvittää uusien potentiaalisten kysyntäjouastokohdeiden teknisiä ominaisuuksia ja niiden soveltuvuutta kysyntäjouastomarkkinoille. Pilottihankkeessa asuinrakennusten sähköisiä lämmityskuormia, kuten käyttövesivaraajaa, varaa- vaa lattialämmitystä, suoraa sähkölämmitystä ja ilmalämpöpumppua, ohjattiin automaattisesti ennalta asetettujen ohjausaikataulujen, lämpötilojen ja käyttäjän määrittelemän lämpötilan mukavuusalueen perusteella hyödyntämällä samalla myös tietoa säästä, sähkönkulutuk-

sesta ja asiakkaan maksamasta sähkön tuntihinnasta. Rakennuksen kuormien ohjauksessa hyödynnettiin kodinenergianhallintajärjestelmää, aggregointisovellusta ja operaattorin käyttöliittymää, jonka kautta välitettiin ohjauskomentoja, seurattiin tarjottavan kuorman suuruutta ja todennettiin ohjauskomentojen toteutumista. Pilottihankkeen tuloksien perusteella todettiin asuinrakennusten sähköisten lämmityskuormien soveltuvan teknisesti hyvin kysyntäjoustomarkkinoille. [121]

Kaukolämmön kysyntäjouaston kehitys on vasta alkuvaiheessa. Kaukolämmön kysyntäjouastosta on saatavilla hyvin vähän tietoa ja asiantuntemusta. Pilottihankkeita, tutkimustietoa ja kaukolämpöjärjestelmiä koskevaa dataa on vähän tai se on huonosti saatavilla. Kaukolämmön kysyntäjouaston järjestelmätason toimivuutta ei myöskään ole asian tärkeyteen nähden tutkittu vielä tarpeeksi Suomessa. Tämän takia on suositeltavaa, että kaukolämpöyrityksissä pyritään laajentamaan kaukolämmön kysyntäjouastoon ja sen toteutusmalleihin liittyvää tietopohjaa ei pelkästään keskenään, vaan myös yhteistyössä tutkijoiden kanssa. [110]

Käytännön esimerkkien ja mallinnusten vähäisyys on suuri haaste kaukolämmön kysyntäjouaston edistämisen kannalta. Kaukolämmön kysyntäjouaston hyötyjen lähteitä ja potentiaalia tarkasteltaessa on myös huomioitava kaukolämpöjärjestelmien erilaisuus. Kaukolämpöjärjestelmissä on eroja muun muassa tuotantorakenteen, lämpöverkon kapasiteetin, kulu- tusprofiilin ja lämmön varastointikyvyn osalta, minkä takia kaukolämmön kysyntäjouaston hyötyjä ja niiden potentiaalia koskevia arvioita ei voida yleistää koskemaan kaikkia kaukolämpöjärjestelmiä eikä kaukolämmön kysyntäjouaston toteutusmalleja. Näin ollen kaukolämmön kysyntäjouaston potentiaalia pitää tarkastella aina järjestelmäkohtaisesti. [110]

Kaukolämmön kysyntäjouasto on rakennuksissa pystyttävä toteuttamaan käytännön tasolla siten, että loppukäyttäjien kokema palvelun laatu ei heikkene havaittavasti. Rakennuksissa kannattavimpana ratkaisuna toteuttaa kaukolämmön kysyntäjouastoa laajassa mittakaavassa pidetään patteriverkoston meno- ja paluuveden lämpötilan hetkellistä alentamista tai rajoittamista. Rakennuksen ilmanvaihtoon tai lämpimään käyttöveteen liittyvien toteutusmallien hyödyntämistä ei pidetä täysin optimaalisena, sillä niitä rajoitettaessa on vaikutuksia yleensä helppo havaita. Ilmanvaihdon rajoittamiseen liittyy myös sellainen huomattava riski, että mahdollisten homeongelmien tapauksessa kaukolämpöyhtiö voidaan katsoa korvausvelvolliseksi, vaikka ilmanvaihto ei olisikaan ongelmien todellinen tai ainoa syy. Rakennuksen patteriverkoston veden virtausta ei myöskään ole kannattavaa rajoittaa, sillä se saattaa ainakin kerrostaloissa johtaa patteriverkoston tasapainon katoamiseen ja lämmön epätasaiseen jakautumiseen huoneiden kesken. [110]

Useimmissa kaukolämmön kysyntäjouastoa käsittelevissä tutkimuksissa rakennuksen sisäilman lämpötilan muutos on pidetty joko yhdessä tai kahdessa celsiusasteessa. Rakennuksessa liian nopea sisäilman lämpötilan muutos kasvattaa tyytymättömien loppukäyttäjien osuutta heidän lämpöviihtyvyyttään heikentämällä. Rakennuksen loppukäyttäjien lämpöviihtyvyyttä ei toisaalta heikennä vielä 0,5 °C/h:n muutos sisäilman lämpötilassa, mutta operatiivinen lämpötila ei saa poiketa enempää kuin yhden celsiusasteen oleskeluvyöhykkeen suunnitellusta sisäilman lämpötilasta. [110]

Fortum ja Aalto-yliopistokiinteistöt Oy toteuttivat kaukolämmön kysyntäjouaston pilottihankkeen yhteistyössä Aalto-yliopiston kanssa, minkä pilottikohteena oli Otaniemen kampusalueella sijaitseva TUAS-talo. Pilottihankkeen tarkoituksena oli selvittää, miten kaukolämmön kysyntäjouaston hyödyntäminen vaikuttaa rakennuksen sisäilman lämpötilaan ja

käyttäjätyytyväisyyteen. Pilottihankkeessa rakennuksen patteriverkoston menoveden lämpötilaa laskettiin 5-20 celsiusastetta 1-4 tuntia kerrallaan ulkoilman lämpötilan ja kaukolämmön hintatietojen perusteella. Rakennuksen patteriverkoston menoveden lämpötilaa laskettiin suurimmillaan kahdesti 20 celsiusastetta neljän tunnin ajaksi yhden vuorokauden aikana. Kaukolämmön kysyntäjoustotoimenpiteiden kestonä pidettiin pääsääntöisesti kuitenkin kahta tuntia patteriverkoston menoveden lämpötilan laskun vaihdellessa 5-15 celsiusasteen välillä. [123]

Pilottikohteessa suoritettujen sisäilmamittausten perusteella kaukolämmön kysyntäjoustop vaikutus kerrosten sisäilman keskilämpötiloihin ja huoneiden lämpötilamuutoksiin oli vähäistä. Kysyntäjoustotoimenpiteiden aikana sisäilman lämpötilamuutosten havaittiin olevan nurkkahuoneissa nopeampaa muihin huoneisiin verrattuna. Kaukolämmön kysyntäjoustop vaikutus huoneiden lämpötilaan oli suurimmillaan 1,04 celsiusastetta. [123] Pilottihankkeen aikana rakennuksen kaukolämmön kulutusta vähennettiin reilun prosentin verran ilman mitään vaikutuksia käyttäjätyytyväisyyteen. Kaukolämmön kysyntäjoustossa arvioitiin olevan kuitenkin vielä suurempaa potentiaalia rakennuksen kaukolämmön kulutuksen vähentämiseksi. [124]

Kysyntäjoustop avulla saavutettavia hyötyjä on tutkittu myös useissa eri diplomitoissa. Esimerkiksi Kristian Martinin diplomityössä [125] on simuloimalla vertailtu kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutuksia rakennuksen energiakustannuksiin käyttämällä keskitettyä ja hajautettua sääntöperusteista algoritmia tilojen lämmityksen, tuloilman sisäänpuhalluslämpötilan sekä ilmapirran ohjauksessa. Tutkimuksessa todettiin hajautetun sääntöperusteisen ohjausalgoritmin olevan keskitettyyn nähden huomattavasti parempi saavuttamalla noin kuumden prosentin säästön rakennuksen lämmityskustannuksissa. Lisäksi tutkimuksessa havaittiin, että kaukolämmön sopimustehoa voidaan leikata 35 prosentilla vaikuttamatta lämpöviihtyvyyteen ollenkaan. Tällöin rakennuksen vuotuisia lämmityskustannuksia olisi mahdollista vähentää 27 - 35 prosentilla riippuen kaukolämmön tarjoajasta.

Aleksi Mäen diplomityössä [126] on simuloimalla avulla puolestaan tutkittu tilojen lämmitystä ohjaavan malliperusteisen algoritmin kysyntäjoustop potentiaalia rakennuksen kustannussäästöjen, energiankäytön joustavuuden ja lämpöviihtyvyyden näkökulmasta. Tutkimuksessa osoitettiin kokeellisin lämpöviihtyvyyksmittauksin vektoriskin kasvavan ikkunoiden lähellä, mikäli niiden pintalämpötila laskee alle 15 celsiusasteen suoritettavien kysyntäjoustotoimenpiteiden aikana. Tämän perusteella tehdyn rajoituksen vaikutus kysyntäjoustop avulla saavutettaviin taloudellisiin kustannussäästöihin ja energian joustavuuteen havaittiin kuitenkin olevan suhteellisen vähäinen. Tutkimuksessa todettiin malliperusteisen ohjausalgoritmin pienentävän toimistorakennuksen vuotuisia lämmityskustannuksia lähes viidellä prosentilla.

4 Kysyntäjouaston potentiaalin tutkiminen

Rakennusautomaation rooli energiatehokkaiden ratkaisujen alustana korostuu tulevaisuudessa entisestään. Teknisten järjestelmien kehittyessä on rakennusten käyttöön ja hallintaan saatavilla yhä monipuolisempia vaihtoehtoja. [5] Nykyään rakennusten online-hallinta ja reaaliaikainen ohjaaminen on jo mahdollista internetin ja uusien digitaalisten ratkaisujen ansiosta. Paikallisen energianhallinnan tulevaisuuden mahdollisuuksia ja haasteita tarkasteltaessa on selvää, että rakennuksiin tarvitaan kaupallisia kuormien ohjausta mahdollistavia ratkaisuja. Uudenlainen järjestelmä on kuitenkin suunniteltava ja toteutettava niin, että se perustuu rakennusten kuormien ohjaamiseen edellyttävän tiedon tehokkaaseen ja automatisoituun hyödyntämiseen energiamarkkinoilla. [19]

Kysyntäjouaston toteuttamisen kannalta tarvitaan rakennuksen energiankulutuksesta ja ohjattavista kuormista yksityiskohtaista tietoa. Rakennuksissa nykyinen päämittaus ei välttämättä ole riittävä kysyntäjousto- ja ohjauspalveluita tarjoavan osapuolen tarpeeseen mitata ja ohjata kuormia reaaliajassa sähkökauppaa säätelevän tasejakson aikana oman palvelutoimintansa optimointiin [19]. Nykyään alamittauksilla ei ole olemassa mitään vakiintunutta käytäntöä. Tämän takia alamittauksia jätetään usein toteuttamatta eikä rakennuksen energiankulutuksen jakautumisesta saada tällöin riittävän tarkkaa tietoa. Mikäli alamittauksiin ei päädytä rakennuksen suunnitteluvaiheessa, on tuleviin tarpeisiin kannattavaa kuitenkin varautua. Esimerkiksi sähköpääkeskuksesta lähteviin suurimpiin syöttölähtiöihin on kannattavaa suunnitella virta- ja jänniteliitynnät mahdollisia kiinteitä tai tilapäisiä sähkömittauksia varten. [127]

Kysyntäjouaston potentiaalisina lähteinä voidaan käytännössä pitää kaikkia laitteita. Laitteiden kyky suorittaa kysyntäjoustopitoimenpiteitä määräytyy kuitenkin laitteiden ominaisuuksien ja toimintamallien perusteella. Kysyntäjouaston potentiaalisimpina lähteinä pidetään automaattisesti energiankulutustaan siirtämään tai muuttamaan kykeneviä laitteita, kuten lämpöpumppuja, vedenlämmittimiä ja energian varastointilaitteita. Rakennusten omalla pien- tuotannolla ja lämmönvarastointikyvyllä on myös merkittävää potentiaalia kysyntäjouastossa. Esimerkiksi rakenteiden ja lämminvesivaraajien lämmönvarastointikykyä hyödyntämällä rakennusten on mahdollista toimia virtuaalisina lämpöenergiavarastoina, mikä luo varteentotettavia ohjausmahdollisuuksia myös kaukolämmön kysyntäjouaston näkökulmasta. [128]

Rakennuksissa käytetään yleensä samantyyppisiä sähkölaitteita rakennusten käyttötarkoituksien erilaisuudesta huolimatta. Rakennuksissa olevia sähkölaitteita on kannattavaa luokitella niiden käyttöajan, ominaisuuksien, kuten esimerkiksi latenssin tai käynnistysajan, ja loppukäyttäjien asettamien vaatimusten perusteella kolmeen eri kategoriaan kysyntäjouastoon soveltuvien sähkölaitteiden tunnistamiseksi: i) ohjattaviin laitteisiin, joiden toiminnan aikaista tehonkäyttöä voidaan säätää, ii) siirrettäviin laitteisiin, joiden käyttöaikaa voidaan siirtää muuhun ajankohtaan ja iii) kriittisiin laitteisiin, joiden tehonkäyttöä tai käyttöaikaa ei voida säätää eikä siirtää. [128] Taulukossa 3 on esitetty kysyntäjouaston toteuttamisen kannalta merkittävimpien sähkölaitteiden keskimääräisiä tehonkäyttöjä, arvioituja ohjausmahdollisuuksia ja kysyntäjouaston potentiaalia.

Taulukko 3. Sähkölaitteiden keskimääräinen tehonkäyttö, ohjausmahdollisuus ja kysyntäjouaston potentiaali [128].

Laite	Keskimääräinen tehonkäyttö [W]	Tehonkäytön säädettävyys	Tehonkäytön siirrettävyys	Kysyntäjouaston potentiaali
Vedenlämmitin	4500	Säädettävä	30 minuuttia	Korkea
Ilmastointilaitte	900 - 3800	Säädettävä	30 minuuttia	Korkea
Astianpesukone	1200	-	Useita tunteja	Korkea
Sähköuuni	2000 - 2500	-	-	Matala
Jääkaappipakastin	150 - 350	-	-	Matala
Kuivausrumpu	2500 - 3000	-	Useita tunteja	Korkea
Pesukone	2500 - 3000	-	Useita tunteja	Korkea
LED-televisio	20 - 60	-	-	Matala
Pöytätietokone	200 - 500	-	-	Matala
Energiansäästö-lamppu	11 - 30	Säädettävä	-	Keskitasoinen
LED-lamppu	10 - 23	Säädettävä	-	Keskitasoinen

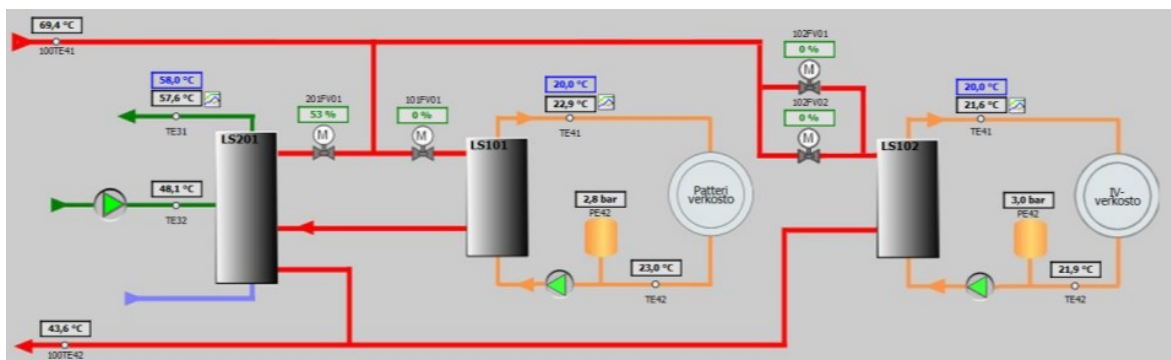
4.1 Suomen pilottikohteet

EU:n innovaatio- ja tutkimusohjelman H2020 rahoittamassa HOLISDER-projektissa on mukana pilottikohteita neljästä eri EU-jäsenmaasta. Suomesta on projektiin valittu mukaan kolme rakennustyyppiltään hyvin erilaista pilottikohdetta: i) kauppakeskus, ii) toimistorakennus ja iii) asuinkerrostalo. Suomen pilottikohteiden lisäksi on projektissa myös mukana pilottikohteita Kreikasta, Iso-Britanniasta ja Serbiasta. Pilottikohteiden erilaisuuden ansiosta kysyntäjouaston potentiaalin määrittäminen voidaan hyödyntää eri rakennustyyppien soveltuvuuden analysoinnissa kysyntäjouastoon perustuvan liiketoiminnan kannalta. EU:n uuden tietosuojasetuksen, GDPR:n, myötä pilottikohteiden loppukäyttäjien yksityisyys on kuitenkin suojattava, minkä takia pilottikohteista ei voida esittää liian yksityiskohtaisia tietoja. Taulukossa 4 on esitetty Suomen pilottikohteiden rakennustyyppi, rakennusvuosi, käyttöaika, kerrosten yhteenlaskettu pinta-ala ja arvioitu loppukäyttäjien lukumäärä vuorokauden aikana.

Taulukko 4. Suomen pilottikohteiden rakennustyyppi, rakennusvuosi, käyttöaika, pinta-ala ja loppukäyttäjien (asukkaiden ja työntekijöiden) lukumäärä [30,129].

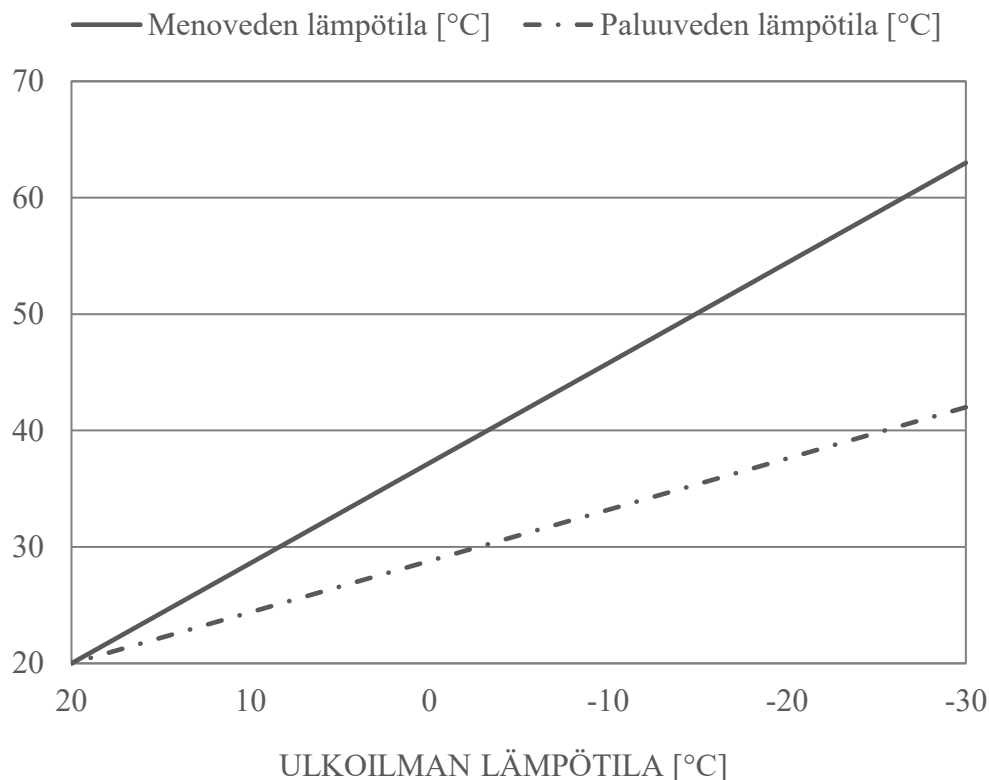
Kohde	Rakennusvuosi	Käyttöaika	Pinta-ala [m ²]	Loppukäyttäjät [kpl/d]
Kauppakeskus	2012	08 - 21 (Ma - Pe) 08 - 18 (La) 11 - 18 (Su)	38711	598
Toimistorakennus	1999	07 - 18 (Ma - Pe)	13843	611
Asuinkerrostalo	2004	00 - 24 (Ma - Su)	5679	121

Suomen kaikkien pilottikohteiden ensisijaisena lämmitysmuotona on kaukolämpö. Kaukolämpöverkosta siirrettävä lämpö luovutetaan lämmönsiirtimien välityksellä lämmitysverkostoihin ja lämpimän käyttöveden valmistukseen. Lämmönsiirtimien mitoituksen perusteessa pääsääntöisesti lämmityspiirien tehontarpeisiin kaukolämpöverkkoon liitetyissä rakennuksissa ei yleensä tarvita erillistä lämminvesivaraajaa. Suomen pilottikohteissa ei lämminvesivaraajia ole asuinkerrostaloa lukuun ottamatta lämpimän käyttöveden valmistuksen tapahtuessa kaukolämmön ohella PILP-järjestelmän avulla. Lämpötiloiltaan poikkeavilla lämmityspiireillä, kuten käyttövesi- ja lämmitysverkostoilla, on yleensä myös oma lämmönsiirtimensä säätölaitteineen. Lämmönjakokeskusten toimintoihin liittyviä mittaustietoja on tarkasteltavissa pilottikohteiden rakennusautomaatiojärjestelmien välityksellä. Suomen pilottikohteiden lämmönjakokeskusten toimintaa tarkastellaan muun muassa lämpö- ja painemittareiden avulla. Kuvassa 8 on esitetty toimistorakennuksen lämmönjakokeskuksen toimintaa.



Kuva 8. Rakennusautomaatiojärjestelmän näkymä toimistorakennuksen lämmitysverkostosta.

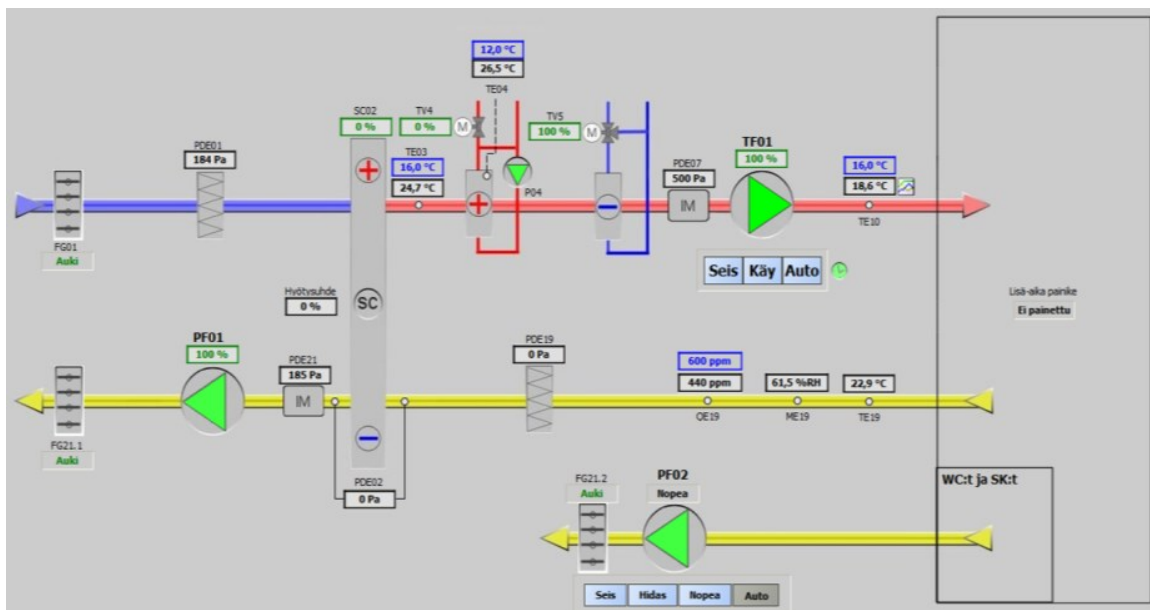
Rakennusten lämmityksen ohjauksessa hyödynnetään rakennusautomaatiota. Rakennusautomaatiota hyödynnetään myös muissa rakennuksen lämmitykseen liittyvissä toiminnoissa, kuten esimerkiksi kaivolämmityksen ja poistoilmalämpöpumpun ohjauksessa ja valvonnassa. Rakennusten lämmitystä ohjataan muun muassa lämmitysjärjestelmän asetusarvojen ja ulkoilman lämpötilan perusteella. Esimerkiksi asuinkerrostalossa rakennuksen lämmitystä ohjataan ulkoilman lämpötilan ja asuintilojen sisäilman keskilämpötilan mukaan. Asuintilojen sisäilman keskilämpötilassa otetaan huomioon kuitenkin vain sellaisten asuntojen sisäilman lämpötila, joka on 18 - 24 celsiusasteen välillä sivuuttaen näin ollen mahdollisten mittausrakenteiden tai asunnon sisäolosuhteisiin vaikuttavien loppukäyttäjän toimien, kuten ikkunan avaamisen tai lisälämmityksen käyttämisen, vaikutuksen. Ulkoilman lämpötilalla ohjataan puolestaan rakennuksen lämmitysverkoston meno- ja paluuvien lämpötilaa. Ulkoilman lämpötilan ja lämmitysverkoston meno- ja paluuvien välistä suhdetta on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Asuinkerrostalon lämmitysverkoston meno- ja paluuv veden säätö ulkoilman lämpötilan funktiona.

Suomen pilottikohteiden rakennusautomaatiojärjestelmissä voidaan muun muassa rakennusten teknisten järjestelmien toimintaa ohjaavia mittaus-, säätö- ja asetusarvoja tarkastella reaaliajassa. Kauppakeskuksessa ja toimistorakennuksessa on käytössä Tridium Niagara -rakennusautomaatiojärjestelmä, ja asuinkerrostalossa Schneider ATMO -rakennusautomaatiojärjestelmä.

Tridium Niagara -rakennusautomaatiojärjestelmässä antureiden mittausarvoja esitetään mustalla tekstillä, kuten esimerkiksi hiilidioksidianturin QE19 mittaama poistoilman hiilidioksidipitoisuus kuvassa 10. Antureiden mittausarvoja rekisteröidään rakennusautomaatiojärjestelmään automaattisesti muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Mittausarvoja voidaan tuoda rakennusautomaatiojärjestelmästä myös muihin ohjelmistoihin, kuten esimerkiksi Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmaan, tietojenkäsittelyä varten. Moottoriventtiilien ja taajuusmuuttajien säätöarvoja esitetään vihreällä tekstillä. Esimerkiksi kuvassa 10 moottoriventtiilin TV5 säätöarvon ollessa 100 prosenttia on tuloilman jäähdytysteho täysillä. Samalla tavalla säädetään myös ilmanvaihtokoneiden taajuusohjattujen tulo- ja poistoilmapuhaltimien pyörimisnopeutta. Rakennusten teknisten järjestelmien toimintaa ohjaavia asetusarvoja esitetään mittausarvojen yläpuolella joko sinisellä tai violetilla tekstillä. Rakennusautomaatiojärjestelmässä vain sinisiä asetusarvoja voidaan määrittää suoraan violettien asetusarvojen muodostuessa laskennallisesti muista arvoista.

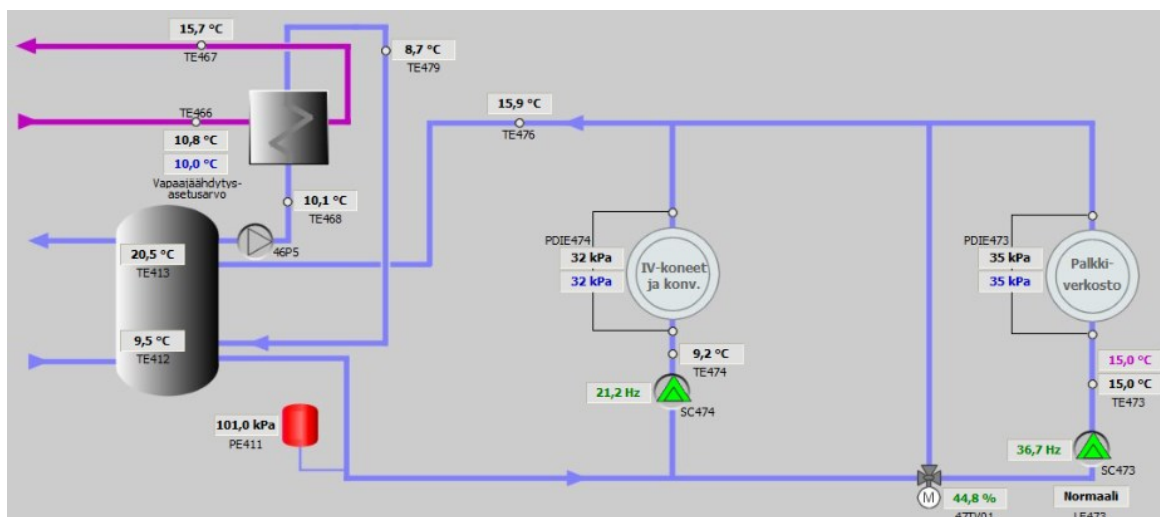


Kuva 10. Toimistorakennuksen ilmanvaihtokoneen TK321 toimintakaavio.

Rakennusautomaatiota hyödynnetään myös Suomen pilottikohteiden ilmanvaihtojärjestelmien ohjauksessa ja valvonnassa ilmanvaihtokoneiden käyttötarkoituksien mukaan. Koneellisten tulo- ja poistoilmajärjestelmien ohjaus perustuu pilottikohteissa muun muassa lämpötiloihin, hiilidioksidipitoisuuksiin ja muihin suureisiin vertailemalla mitattua suuretta asetettuun raja-arvoon. Esimerkiksi hiilidioksidiantureiden mittaustietoa hyödynnetään pilottikohteiden ilmanvaihtokoneiden puhallinnopeuksien ohjauksessa. Pienimmillä ilmanvaihtokoneilla ohjaus on toteutettu tavallisesti pelkällä päälle/pois -komennolla tai kahdella nopeusvaihtoehdolla pysäyttämisen ohella. Suomen pilottikohteiden ilmanvaihtojärjestelmien energiankulutus sisältyy rakennusten kokonaisenergiankulutukseen erottelemattomana sähkön ja kaukolämmön alamittauksien puuttuessa. Poikkeustapauksena on kauppakeskuksen koneellinen tulo- ja poistoilmajärjestelmä, minkä suurimpien ilmanvaihtokoneiden sähkönkulutusta mitataan tulo- ja poistoilmapuhaltimiin jaoteltuina. Asuinkerrostalossa on ainoastaan koneellinen poistoilmavaihto.

Suomen pilottikohteissa valaistusta ohjataan rakennusautomaation valoisuus- ja aikaohjauksen sekä liike- ja läsnäolotunnistimien avulla. Esimerkiksi ulkovalaistusta ohjataan aikaohjauksen ja valoisuusantureiden mittaaman ulkovaloisuuden perusteella. Suomen pilottikohteissa valaistuksella ei ole omaa sähkön alamittausta.

Rakennusten jäähdytystä ohjataan rakennusautomaatiolla lämmityksen tavoin arvovertailun avulla. Kauppakeskuksen ja toimistorakennuksen rakennusautomaatiojärjestelmissä pystytään tarkkailemaan muun muassa jäähdytysyksiköiden lämpötiloja ja paineita. Asuinkerrostalossa ei sen sijaan ole jäähdytysjärjestelmää. Kuvassa 11 on esitetty kauppakeskuksen vedenjäähdytyskoneen VJK1 jäähdytysverkostoa. Kauppakeskuksen ja toimistorakennuksen jäähdytysyksiköiden sähkönkulutusta mitataan joko osana rakennuksen kokonais-sähkönkulutusta tai omana sähkön alamittauksenaan jäähdytysyksikön muodostaessa oman keskuksensa.



Kuva 11. Rakennusautomaatiojärjestelmän näkymä kauppakeskuksen vedenjäähdytyskoneen VJK1 jäähdytysverkostosta.

Suomen pilottikohteiden varustelutasoon lukeutuu rakennusten käyttötarkoituksista ja kerros määrästä johtuen muun muassa hissejä, sähkökiukaita, erilaisia keittiölaitteita ja muita sähkölaitteita. Näiden lisäksi pilottikohteista löytyy myös muita kysyntäjoustoon soveltuvia sähkölaitteita kiinteinä, puolikiinteinä ja irrallisina laitteina. Esimerkiksi kauppakeskuksen ja toimistorakennuksen toimistohuoneilla on oma huonesäätimensä, jolla huonelämpötilaa voidaan säätää loppukäyttäjien mieltymyksien mukaan.

Kauppakeskuksessa ja toimistorakennuksessa on omaa sähkön pientuotantoa. PV-järjestelmällä tuotettava sähkö hyödynnetään molemmissa kohteissa kokonaan kattaen vain pienen osuuden rakennuksen sähkön kokonaiskulutuksesta. Sähköntuotantoa mitataan tunnin tarkkuudella, ja mittauksien rekisteröimisessä käytetään erillisiä ohjelmistoja.

Asuinkerrostalossa on rakennuksen poistoilman lämpöä hyödyntävä PILP-järjestelmä, jota käytetään asuin- ja yhteistilojen lämmityksessä sekä lämpimän käyttöveden valmistuksessa kaukolämmön ohella. Asuinkerrostalon PILP-järjestelmän avulla tuotetusta lämmöstä osa pystytään varastoimaan myös rakennuksen lämminvesivaraajaan. Kaukolämmön kausihinnon takia PILP-järjestelmä ei kuitenkaan ole asuinkerrostalossa käytössä kaukolämpöyhtiön määrittelemänä kesäkauna kaukolämmön ollessa pääsääntöisesti sähköä edullisempi lämmitysvaihtoehto. Asuinkerrostalossa ei ole PILP-järjestelmän lämmöntuotannon tai sähkönkulutuksen alamittauksia, minkä takia COP:sta ei ole tietoa saatavilla.

4.2 Pilottikohteiden kuormat

Suomen pilottikohteiden kuormitusselvityksen tarkoituksena oli selvittää rakennusten joustopotentiali. Mimmi Niemistön diplomityössä [30] tehdyssä kuormitusselvityksessä hyödynnettiin rakennusten luovutusaineistoista ja rakennusautomaatiojärjestelmistä saatavia tietoja. Muita tietolähteitä hyödynnettiin tarpeen mukaisesti. Ensisijaisena tietolähteenä pilottikohteiden kuormitusselvityksessä käytettiin rakennusten luovutusaineistoja rakennusautomaatiojärjestelmien antaessa tietoa vain niihin liitetyistä laitteista. Rakennusten luovutusaineistoissa oli kuitenkin ristiriitaisuuksia muun muassa laitteiden määrissä, sijainneissa ja teknisissä tiedoissa. Lisäksi osa tarvittavista tiedoista puuttui kokonaan.

pilottikohteiden sähkökuormat sen sijaan luokiteltu laitteiden käyttökohteiden perusteella kuuteen eri ryhmään: i) lämmitys, ii) jäähdytys, iii) ilmanvaihto, iv) valaistus, v) keittiö ja vi) muut. Rakennusten lämmitykseen, jäähdytykseen, ilmanvaihtoon ja valaistukseen tarvittavien laitteiden sähkökuormat on luokiteltu laitteiden käyttökohteiden mukaisesti niille nimettyihin ryhmiin. Asuinkerrostalossa on PILP-järjestelmään liittyvien poistoilmapuhaltimien sähkökuorma toisaalta poikkeuksellisesti sisällytetty rakennuksen lämmityskuormaan. Suomen pilottikohteiden keittiökuormiin on huomioitu ruoanvalmistuslaitteiden sähkökuormat pienkodinkoneista ammattikeittiön laitteisiin. Muihin kuormiin on sisällytetty kaikkien muiden laitteiden, kuten esimerkiksi televisioiden, pyykinpesukoneiden, jätevesipumppujen, tietokoneiden ja kopiokoneiden, sähkökuormat. Taulukossa 6 on esitetty Suomen pilottikohteiden manuaalisesti ohjattavien ja automaatio-ohjattavien sähkökuormien luokittelua käyttökohteittain.

Taulukko 6. Suomen pilottikohteiden sähkökuormat käyttökohteittain luokiteltuna [30].

Kohde	Sähkökuormat [kW]					
	Lämmitys	Jäähdytys	Ilmanvaihto	Valaistus	Keittiö	Muut
Kauppakeskus	150	1000	440	570	730	310
Toimistorakennus	70	380	110	530	410	120
Asuinkerrostalo	40	-	2	54	1160	187

Kuormitusselvityksessä on syytä huomioida Suomen pilottikohteiden lämpö- ja lämmityskuormien ero. Suomen pilottikohteiden lämpökuormiin on sisällytetty kaukolämpölaitteistojen lämmönsiirtimien tehot, kun taas lämmityskuormilla on viitattu rakennusten lämmitykseen tarvittavien sähkölaitteiden, kuten lämmitysverkoston kiertovesipumppujen, lattialämmityksen ja poistoilmalämpöpumpun kompressorin, aiheuttamiin kuormiin. Suomen pilottikohteissa lämmönjakokeskuksen kokonaiskuorma koostuu esimerkiksi kaukolämpölaitteiston lämmönsiirtimien tehojen aiheuttamien lämpökuormien lisäksi myös sähkökuormista moottoritoimisten laitteiden ja muun kiinteistöautomaatiikan myötä. Kuormitusselvityksessä on toisaalta huomioitu lämmönjakokeskuksen sähkökuormien osalta vain kiertovesipumppujen sähkökuormat muiden laitteiden sähkökuormien ollessa suhteellisen pieniä. Kuormitusselvityksessä on pilottikohteiden lämmityskuormiin huomioitu rakennuksen lämmitysjärjestelmän kiertovesipumppujen ja lattialämmityksen sähkökuormien lisäksi myös sulanapidon ja sähkökiukaiden sähkökuormat.

Suomen pilottikohteiden ilmanvaihtokuormiin on huomioitu rakennusten ilmanvaihtojärjestelmiin kuuluvien tulo- ja poistoilmapuhaltimien, pumppujen sekä muiden laitteiden sähkökuormat. Kuormitusselvityksen rajauksesta huolimatta muutamien savukaasupuhaltimien sähkökuormat on kuormitusselvityksessä huomioitu niiden toimiessa normaalitilanteissa koneellisen tulo- ja poistoilmanvaihtojärjestelmän poistoilmapuhaltimina. Näiden lisäksi pilottikohteista löytyy muun muassa kiertoilmakoneita ja erillispoistoja. Kiertoilmakoneita hyödynnetään ilman kierrätyksessä palauttamalla ilman takaisin samaan tilaan, ja koneellisiin poistoilmanvaihtojärjestelmiin lukeutuvia erillispoistoja keskusilmanvaihtolaitteille ja lämmöntalteenotolla varustetuille ilmanvaihtokoneille soveltumattoman likaisen ilman poistamiseen epäpuhtauksien syttymis- tai palamisvaaran takia [130]. Kyseisten laitteiden sähkö-

kuormat ovat tavallisesti kuitenkin pilottikohteiden pienimpiä muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta, kuten toimistorakennuksessa oleva 13 kW erillispoisto.

Kauppakeskuksen ja toimistorakennuksen sähkötoimisten jäähdytysprosessien myötä jäähdytyskuorma muodostaa yhden keskeisimmistä sähkökuormista kyseisissä kohteissa. Kuormitus selvityksessä on pilottikohteiden jäähdytyskuormiin huomioitu koko laiteyksikön, kuten pumppujen, kompressoreiden ja lauhduttimien, sähkökuorma.

Suomen pilottikohteiden valaistuskuumia on kuormitus selvityksessä käsitelty kerroskohtaisesti yhtenä kokonaisuutena huomioimalla koko kerroksen valaistukseen käytettävien lampujen sähkökuormat. Valaistuskuumia on kerros- ja rakennustasolla pilottikohteiden merkittävimpiä sähkökuormia koostuessaan lukuisista pienistä eri sähkökuormista.

4.3 Kuormien siirtorajoitteet

Suomen rakentamismääräyksillä rajoitetaan pilottikohteiden lämpö- ja sähkökuormien siirtomahdollisuuksia. Suomen rakentamismääräyksien asettamilla rajoituksilla on pilottikohteiden lämpökuormien kohdalla vaikutusta rakennuksen lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden lämpötilaan sekä sähkökuormien osalta jäähdytykseen, ilmanvaihtoon ja valaistukseen. Pilottikohteiden kuormien vaikuttaessa olennaisesti rakennusten loppukäyttäjien viihtyvyyteen ja terveyteen on kysyntäjouoston toteutuksessa huomioitava myös kuormien siirron mahdollinen vaikutus rakennusten sisäympäristöön. Näin ollen rakennusten tilojen käytettävyyden on varmistettava sisäympäristöön liittyvillä mittauksilla pilotoinnin aikana.

Lämpökuormien siirrossa on huomioitava rakennuksen sisäilman lämpötilan lisäksi myös lämmönjakokeskuksen toiminta. Esimerkiksi radiaattorilämmityksessä suositellaan menoveden lämpötilaksi mahdollisimman matalaa lämpötilaa lämmitysverkoston hyvän säädettävyyden ja energiatehokkuuden takia [131]. Lämpimän käyttöveden lämpötila olisi myös pidettävä kaikkialla vesijärjestelmää aina vähintään 50 - 55 celsiusasteessa muun muassa legionellabakteerien takia [132]. Näiden lisäksi lämpökuormien siirtoa rajoittaa myös lämpimän käyttöveden kiertovesipumppu, jonka on oltava koko ajan toiminnassa. Muita kiertovesipumppuja voidaan kuitenkin pysäyttää hetkellisesti. Rakennuksen lämmitystä rajoitettaessa on huomioitava myös mahdollinen lämpökuormien siirrosta aiheutuva ilmanvaihtokoneiden jäätymisriski.

Pilottikohteiden nestejäähdytysyksiköitä hyödynnetään tilajäähdytyksessä ja elintarvikkeiden säilytyksessä. Säilytyslämpötilan ja -ajan vaikuttaessa elintarvikkeiden pilaantumiseen liian pitkäaikainen kuorman siirto saattaa aiheuttaa haitallisten bakteerien esiintymistä elintarvikkeissa [30]. Näin ollen jäähdytyskuormien siirrossa on huomioitava rakennuksen sisäilman lämpötilan ohella myös elintarvikkeiden säilytyslämpötila. Rakennuksen jäähdytys- ja lämpökuormien siirrossa on huomioitava myös muiden lähteiden, kuten auringonsäteilyn, valaistuksen, laitteiden ja ihmisten, lämpökuormien lisäksi tilan käyttötarkoitus ja -aika.

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän on ylläpidettävä riittävä sisäilman laatu tuoden puhdasta ilmaa hengitykseen ja poistaen rakennuksessa syntyviä epäpuhtauksia. Ilmanvaihtokuormien siirrossa on näin ollen huomioitava sisäilman lämpötilan lisäksi myös epäpuhtauspitoisuuksien, kuten hiilidioksidi-, hiilimonoksidi- ja pienhiukkaspitoisuuksien, pysyminen sallituissa rajoissa. Esimerkiksi sisäilmaluokassa S1 on rakennuksen sisäilman hiilidioksidipitoisuuden suurin sallittu ylitys 350 ppm ulkoilman hiilidioksidipitoisuudesta sekä vastavasti 550 ppm ja 800 ppm sisäilmaluokissa S2 ja S3 [133].

Rakennuksissa asuntojen ilmanvaihto suunnitellaan tavallisesti siten, että ulkoilmavirta on vähintään $0,35 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{m}^2$. Tämä vastaa ilmanvaihtokerrointa $0,5 \text{ l/h}$ huoneessa, jonka vapaa korkeus on $2,5 \text{ m}$. Rakennuksen käyttöajan ulkopuolella on ulkoilmavirran oltava vähintään $0,15 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{m}^2$, mikä on mahdollista toteuttaa esimerkiksi pitämällä hygieniatilojen ilmanvaihtoa koko ajan käynnissä tai ilmanvaihdon jaksottamisella. Ilmanvaihto suunnitellaan rakennuksissa yleensä myös ulkoilmaan nähden tasapainaiseksi, jotta rakenteiden kosteusvaurioilta ja mikrobien aiheuttamilta terveyshaitoilta voidaan välttyä. [134] Tämän takia ilmanvaihtokuormien siirrossa on kiinnitettävä huomiota lisäksi myös tulo- ja poistoilmavirtojen suhteeseen haitallisten paine-erojen välttämiseksi.

Rakennuksen ilmanvaihtojärjestelmän puhtaudella on myös merkitystä. Ilmanvaihtojärjestelmän puhtaanapito ei varsinaisesti liity kuormien siirtoon, mutta laitteiden asianmukaisella kunnossapidolla ja huollolla on vaikutusta laitteiden kuormien suuruuteen. Esimerkiksi ilmanvaihtokoneen suodattimien likaisuus vaikuttaa ilmavirtauksen painehäviöön, mikä puolestaan vaikuttaa taas huomattavasti puhaltimien sähkönkulutukseen ja ilmanvaihtojärjestelmän ominaissähkötehoon. [130]

Rakennuksen valaistuskuormien siirtoon liittyviä rajoitteita on esitetty standardeissa. Rakennuksen ja sen ympäristön valaistusolosuhteiden on varmistettava riittävän valaistuksen lisäksi myös rakennuksen turvallinen käyttö ja huolto [135]. Sähkökuormien kohdalla on noudatettava myös sähköturvallisuusmääräyksiä ja laitekohtaisia rajoituksia. Sähkölaitteiden käyttöohjeiden noudattaminen vähentää loppukäyttäjien kohdistuvia turvallisuusriskejä ja laitteiden ennen aikaista vioittumista. Sähkökuormien siirrossa on vältettävä myös mahdollisten melu- tai hajuhaittojen syntymistä. [30]

4.4 Kuormien ohjaus ja säätö

HOLISDER-projektin tavoitteena on käyttöönottaa kokonaisvaltainen kysyntäjoustopuhtautuksen mahdollistava tiedonhallinnan viitekehys, joka mahdollistaa kaupallisten rakennusten ja asuinrakennusten toimimisen merkittävänä edistäjänä energiaverkkojen tasapainottamisessa. HOLISDER-projektissa kehitettävä ratkaisu koostuu kolmesta eri pääkomponentista: i) tiedonhallinnan viitekehyksestä, joka mahdollistaa avoimen, yhteentoimivan ja turvallisen standardipohjaisen tiedonsiirron koko kysyntäjoustopuhtautuksen arvoketjussa, ii) kysyntäjoustopuhtautuksen optimointi ja kuormien ohjaus -järjestelmästä, joka muodostuu kysyntäjoustopuhtautusta alueta- salla optimoivasta globaalista kysynnänhallinnasta ja rakennustasolla optimaalisia kysyntäjoustopuhtautustoimenpiteitä suorittavasta paikallisesta kysynnänhallinnasta sekä iii) visualisointi ja loppukäyttäjät -työkaluohjelmistosta, joka integroi, konfiguroi ja laajentaa eri moduuleita täysimittaisen palveluiden ja käyttöliittymien kehittämiseksi loppukäyttäjien ja muiden sidosryhmien tarpeisiin. [136]

HOLISDER-projektissa avoimen, yhteentoimivan ja turvallisen tiedonhallinnan viitekehysten tavoitteena on varmistaa tekninen ja semanttinen yhteentoimivuus vakavaraisia avoimia standardeja ja protokollia hyödyntäen koko kysyntäjoustopuhtautuksen arvoketjussa, missä yhdistetään kaksi suurta kaupallista tekniikkaa saumattoman integroinnin, tiedonsiirron ja toiminnan varmistamiseksi: i) Honeywell'in JACE, joka mahdollistaa yhteentoimivuuden useimpien energianhallintajärjestelmien ja rakennusautomaatiossa käytettävien tiedonsiirtoprotokollien, kuten BACnet, LonWorks, KNX, Modbus ja OPC-UA, välillä ja ii) TNO:n EFI, joka varmistaa yhteentoimivuuden laitteiden ja useimpien älykodissa käytettävien tiedonsiirtoprotokollien, kuten ZigBee, Bluetooth, 6LowPan ja Z-Wave, välillä. JACE voidaan myös

integroida Tridium Niagara -rakennusautomaatiojärjestelmään, minkä avulla se pystyy toimimaan paikallisen kysynnänhallinnan käyttöönottoalustana. [137]

Kokonaisvaltainen kysyntäjoustoprofiilointi ja kuormien ohjaus -järjestelmä koostuu kahdesta eri pääkomponentista: i) globaalista kysynnänhallinnasta ja ii) paikallisesta kysynnänhallinnasta. Globaali kysynnänhallinta, GDM, suorittaa korkeatasoista kysyntäjoustoprofiilointia. GDM:n ensisijaisena toiminnallisuutena on optimaalisimman menetelmän ratkaiseminen jakaa jakeluverkonhaltijan tai aggregaattorin määrittämä joustavuustarve yksittäisille rakennuksille niiden joustopotentialin mukaan. GDM seuraa kysyntäjoustoprofiilointien etenemistä rakennuksissa ja suunnittelee vaihtoehtoisia strategioita varmistaakseen joustavuustarpeen täyttymisen mahdollisissa ongelmatilanteissa. GDM välittää tiedon joustavuustarpeesta rakennuksen paikalliselle kysynnänhallinnalle käyttämällä standardisoituja OpenADR-pohjaisia viestejä väliohjelmiston kautta. Väliohjelmisto, MOM, luo saumattoman, avoimen ja homogeenisen standardipohjaisen rajapinnan, joka toimii yksittäisten moduulien tiedonsiirtoa helpottavana tiedonsiirto- ja tiedontallennuskeskuksena. [138]

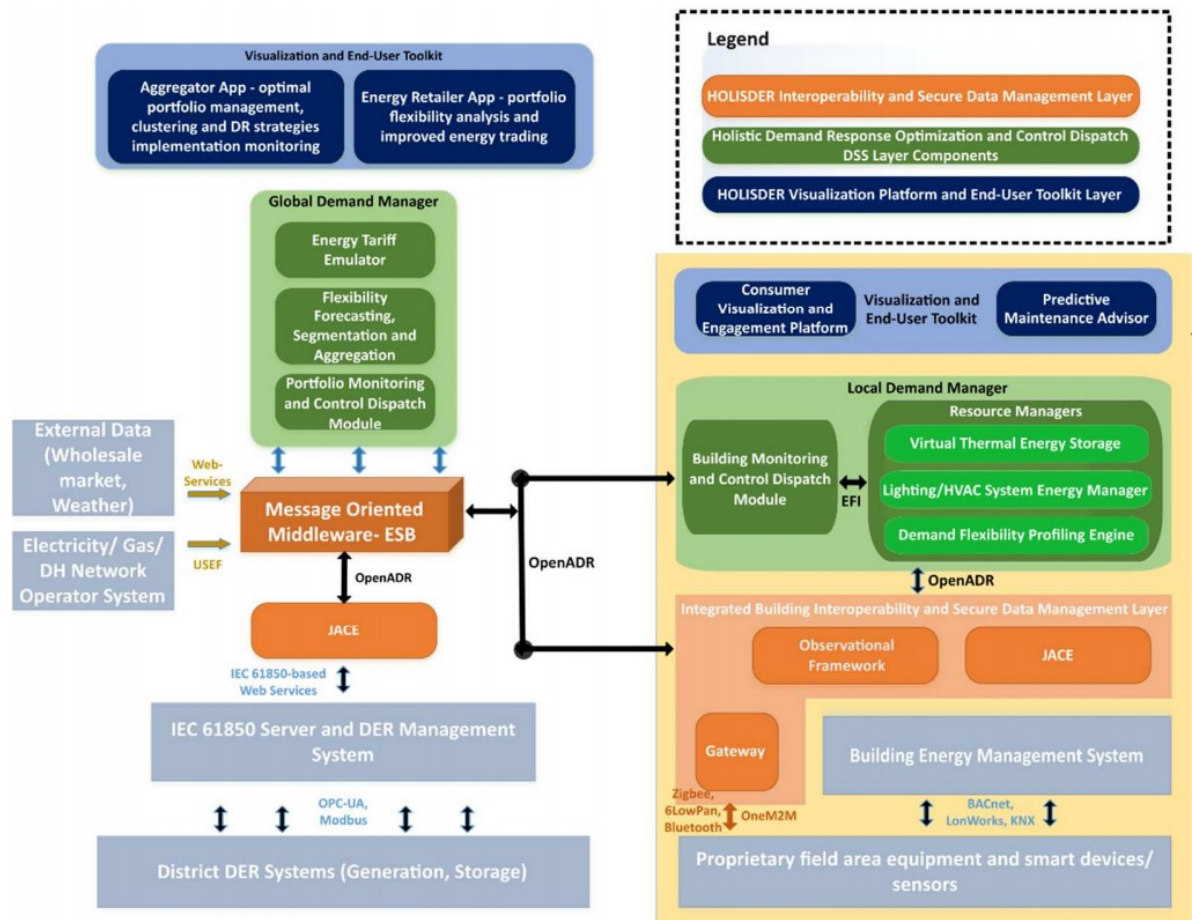
Paikallinen kysynnänhallinta, LDM, suorittaa kysyntäjoustoprofiilointia GDM:n pyytämän joustavuustarpeen mukaan rakennuksessa. LDM on vastuussa kolmesta ensisijaisesta toiminnallisuudesta: i) rakennuksen joustopotentialin määrittämisestä, ii) kysyntäjoustoprofiilointien suorittamisesta ja iii) kysyntäjoustoprofiilointien etenemisen seurannasta rakennuksessa. LDM kerää tietoa laitteiden kyvystä muuttaa energiankulutustaan ja niiden soveltuvuudesta suorittaa erityyppisiä kysyntäjoustoprofiilointia. LDM jakaa pyydetyn joustavuustarpeen laitteiden ominaisuuksien mukaan sekä ohjaa niiden toimintaa ihmiskeskeistä lähestymistapaa noudattaen riittävän sisäympäristön laadun ja viihtyvyyden säilyttämiseksi. [138] LDM arvioi loppukäyttäjien tyytyväisyyden todennäköisyyttä lämpöviihtyvyyteen ja visuaaliseen viihtyvyyteen Bayesin teoreeman avulla sekä muodostaa niistä myös ennakoarvioita. Rakennuksen joustopotentialin määrittäminen perustuu energiakustannuksien minimointiin ja MPC-algoritmin avulla muodostettaviin ennakoarvioihin rakennuksen energiankulutuksessa tapahtuviin muutoksiin suoritettavien kysyntäjoustoprofiilointien myötä. Eksplisiittisen kysyntäjoustoprofiilointijärjestelmän ollessa projektissa edelleen kehitysvaiheessa ei rakennuksen joustopotentialin määrittämisessä käytettäviä yhtälöitä ole vielä määriteltä sen tarkemmin. [128].

Eksplisiittisen kysyntäjoustoprofiilointijärjestelmän lähtökohtana on rakennuksen sähkö- ja lämpökuormien ohjauksen toteuttaminen LDM:n kautta. Kysyntäjoustoprofiilointien aikana ohjaa LDM rakennuksen lämmitystä, jäähdytystä, ilmanvaihtoa ja valaistusta niiden asetusarvoja tai muunlaisten rakennusautomaatiojärjestelmään kytkettyjen laitteiden tehoa säätämällä GDM:n pyytämän joustavuustarpeen täyttymiseksi. Eksplisiittisessä kysyntäjoustoprofiilointijärjestelmässä rakennuksen sähkö- ja lämpökuormien ohjaus toteutetaan vaiheittain seuraavalla tavalla [128]:

1. LDM hakee suoraan havaintokomponentilta tai väliohjelmiston Cassandra-tietokannasta aiempia mittaustietoja ulkoilman lämpötilasta, sisäilman laadusta ja lämpötilasta, valoisuudesta sekä tietoa loppukäyttäjien tekemistä säätö- ja ohjaustoimista.
2. LDM:n profilointikomponentti arvioi lämpöviihtyvyyden ja visuaalisen viihtyvyyden haettujen mittaustietojen perusteella.
3. LDM hakee Cassandra-tietokannasta sääennusteen ulkoilman lämpötilasta ja auringon säteilyvoimakkuudesta.

4. LDM muodostaa ennakkoarvion rakennuksen energiankulutuksesta ja joustopotentialista kilowatteina seuraavan aikaikkunan aikana ennalta määritetyin aikavälein.
5. LDM välittää tiedon rakennuksen joustopotentialista GDM:lle.
6. LDM odottaa pyyntöä GDM:ltä kysyntäjoustotoimenpiteiden suorittamista varten.
7. Mikäli pyyntöä ei saavu, LDM suorittaa kuormien ohjauksen rakennuksen energiankulutuksen ennakkoarvion mukaan.
8. Mikäli pyyntö saapuu, LDM suorittaa kuormien ohjauksen rakennuksen energiankulutuksen ennakkoarviosta vähennetyn tai lisätyn joustavuustarpeen mukaan.
9. LDM välittää reaaliaikaista tietoa rakennuksen energiankulutuksesta ja kysyntäjoustotoimenpiteiden etenemisestä GDM:lle.
10. Vaiheen 9 valmistuttua aloitetaan vaiheesta 1 uudestaan.

HOLISDER-projektissa kehitettävä visualisointi ja loppukäyttäjät -työkaluohjelmisto koostuu monista eri rajapinnoista ja monikäyttöisistä hallintatyökaluista, joiden tarkoituksena on: i) lisätä loppukäyttäjien tietoisuutta kulutusmalleista ja ilmoittaa suoritettavista kysyntäjoustotoimenpiteistä, ii) hallita optimaalisesti aggregaattoreiden portfolioita ja seurata kysyntäjoustotoimenpiteiden etenemistä, iii) kehittää energian tuottajien ja jälleenmyyjien liiketoimintaa portfolioiden joustavuusanalyysin avulla ja iv) edistää kiinteistöjen energianhallintaa ja ennakoivaa kunnossapitoa. [138] HOLISDER-projektissa kehitettävän ratkaisun pääkomponenttien välistä tiedonsiirtoa on esitetty kuvassa 12.



Kuva 12. Tiedonsiirron käsitteellinen arkkitehtuuri HOLISDER-ratkaisussa [137].

Suomen pilottikohteiden erilaisten rakennustyyppien, loppukäyttäjien ja rakennusautomaatiojärjestelmien takia rakennuksissa on tarkoituksena käyttöönottaa kaksi eri kysyntäjoustopäijärjestelmää. Kauppakeskuksessa ja toimistorakennuksessa on tarkoituksena käyttöönottaa kuvassa 12 esitetty eksplisiittinen kysyntäjoustopäijärjestelmä, jossa rakennusten sähkö- ja lämpökuormia ohjataan suoraan ulkoisen ohjauksen avulla.

Asuinkerrostalossa on puolestaan tarkoituksena käyttöönottaa implisiittinen kysyntäjoustopäijärjestelmä, jossa rakennuksen sähkö- ja lämpökuormia ohjataan rakennusautomaatiojärjestelmään ohjelmoidun aikataulutuksen avulla energiakustannuksien vähentämiseksi nykyisten kaukolämpö- ja sähkötariffien perusteella. Rakennuksen sähkö- ja lämpökuormien ohjausaikataulun suunnittelemisessa on hyödynnetty keskimääräistä sähkön ja kaukolämmön kulutusta vuorokauden aikana kuormitushuippujen ja siten myös suurimman kysyntäjoustopäipotentialin tunnistamiseksi. HOLISDER-projektissa implisiittisten kysyntäjoustopäijärjestelmien tavoitteena on edistää loppukäyttäjien energiemarkkinoilla osallistumista ja tarjota energiayhtiöille uusia liiketoimintamahdollisuuksia, kuten uudenlaisten hinnoittelumallien kehittämisellä ja energiemarkkinoilta ostettavan energiamäärän optimoimisella asiakkaiden joustavuusennusteiden perusteella [139].

Asuinkerrostalossa tavoitteena on tutkia lämmityksen ja ilmanvaihdon tehon rajoittamisen vaikutuksia rakennuksen energiankulutukseen, energiakustannuksiin sekä sähkön ja kaukolämmön kuormitushuippuihin. Asuinkerrostalon rakennusautomaatiojärjestelmässä pystytään muun muassa muuttamaan lämmityksen ja ilmanvaihdon asetusarvoja, ohjaamaan saunan lämmitystä sekä hallitsemaan PILP-järjestelmän toimintaa. Lämmityskaudella on rakennuksen asuin- ja yhteistilojen ilmanvaihdon teho pidetty yleensä 75 prosentissa hyvän sisäilman laadun ylläpitämiseksi, ja jotta PILP-järjestelmällä on ollut mahdollisimman tasainen kuorma. Rakennuksen asuintiloissa on sisäilman lämpötila pidetty lämmityskaudella yleensä myös 21,5 celsiusasteessa ja yhteistilojen sisäilman lämpötila muutamaa celsiusastetta alempana riippuen kyseisen tilan huonelämpötilan suunnitteluarvosta. Rakennuksen sähkö- ja lämpökuormia ohjataan vuorokauden ajankohdan mukaan seuraavilla tavoilla:

1. Ilmanvaihdon tehon pienentäminen 50 prosenttiin asuintiloissa ja ilmanvaihdon pysäyttäminen kokonaan yhteistiloissa klo 07 - 08
2. PILP-järjestelmän sammuttaminen klo 15 - 17
3. Lämmityksen vähentäminen sallien asuintilojen sisäilman lämpötilan alentua enintään yhdellä celsiusasteella klo 21 - 22.30

Rakennuksen asuin- ja yhteistilojen ilmanvaihdon tehon rajoittamisen aikana sisäilman hiilidioksidipitoisuuden ylärajaksi asetetaan 1200 ppm ja suhteelliselle kosteudelle 60 prosenttia, joiden ylittyessä palautetaan ilmanvaihdon teho takaisin normaaliin. Ilmanvaihdon tehon rajoittamisen aikana rakennuksen yhteistiloihin kuuluvat oleskelutilat, kuten kerhohuone ja sauna, eivät ole käytettävissä. Sisäilman lämpötilan alentamisen aikana rakennuksen lämmitystä ohjataan asuintilojen sisäilman keskilämpötilan perusteella. Asuintilojen sisäilman keskilämpötilan asetusarvoa muutettaessa ohjautuu rakennuksen lämmitysverkostossa laitteiden, kuten venttiilien ja pumppujen, toiminta automaattisesti noudattamaan uuden sisäilman lämpötilan ylläpitämistä. Rakennuksen asuintiloissa sisäilman keskilämpötilan sallitaan pudota enintään yhdellä celsiusasteella ennen kuin lämmitystä ohjataan takaisin päälle. Asuintilojen sisäilman keskilämpötilan laskettua yhdellä celsiusasteella rakennuksen lämmitystä pidetään yllä niin, että sisäilman keskilämpötila pysyy 20,5 celsiusasteessa, ja palautetaan takaisin normaaliksi kysyntäjoustopäitoimenpiteen suorittamisen jälkeen.

4.5 Mittauslaitteiden asennus

Suomen pilottikohteissa suoritettavien kysyntäjoustotoimenpiteiden myötä seurataan rakennuksissa sähkö- ja lämpökuormien ohjauksen aiheuttamia vaikutuksia muun muassa sähköverkon tehotasapainoon sekä asuin- ja yhteistilojen sisäilman laatuun ja lämpötilaan. Kysyntäjoustotoimenpiteiden aikana seurataan Suomen pilottikohteissa sähköverkon tehotasapainoa taajuusmittauksia suorittamalla. Kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikuttaessa olennaisesti myös pilottikohteiden loppukäyttäjien viihtyvyyteen ja terveyteen seurataan asuin- ja yhteistilojen käytettävyyttä sisäympäristöön liittyvillä mittauksilla. Kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutuksien arvioimiseksi sekä HOLISDER-projektissa määriteltujen käyttötapauksien ja käytettävien suorituskykykymittarien edellyttäessä tiettyjen suureiden, kuten sisäilman lämpötilan ja hiilidioksidipitoisuuden, mittaamista on Suomen pilottikohteisiin asennettava myös uusia laitteita tarpeen mukaan.

Kauppakeskuksesta ja toimistorakennuksesta poiketen ei asuinkerrostalossa ole kuitenkaan tarpeeksi vielä sisäilman mittauslaitteita. Asuinkerrostalon lämmitystä ja ilmanvaihdon tehoa rajoitettaessa mitataan rakennuksen asuin- ja yhteistiloissa sisäilman lämpötilaa, hiilidioksidipitoisuutta ja suhteellista kosteutta. Näiden lisäksi asuinkerrostalon pesutuvassa mitataan haihtuvien orgaanisten yhdisteiden pitoisuutta. Taulukossa 7 on esitetty asuinkerrostaloon asennettavien uusien laitteiden tietoja.

Taulukko 7. Asuinkerrostaloon asennettavien uusien laitteiden tiedot.

Kerros	Laitteen sijainti	Laitteen valmistaja	Laitteen malli
Pohjakerros	Saunan pukuhuone	Connected Finland	Detectify
Pohjakerros	Saunan suihkutila	Connected Finland	AirWits CO2
Pohjakerros	Kerhohuone	Connected Finland	AirWits CO2
1. kerros	Pesutupa	Connected Finland	AirWits TVOC
1. kerros	Asunto N/A	HK Instruments	CDT-MOD-2000-1R-rH-D
1. kerros	Asunto N/A	HK Instruments	CDT-MOD-2000-1R-rH-D
4. kerros	Asunto N/A	HK Instruments	CDT-MOD-2000-1R-rH-D
4. kerros	Asunto N/A	HK Instruments	CDT-MOD-2000-1R-rH-D

4.6 Energiankulutuksen mittaus

Suomen pilottikohteiden energiankulutusta mitataan rakennusten kaukolämmön ja sähkön päämittauksien avulla. Suomen kaikissa pilottikohteissa on käytössä tuntiperusteinen älymittaus niin sähkön kuin myös kaukolämmön kulutuksen osalta. Pilottikohteiden kaukolämmön ja sähkön päämittaustiedot ovat saatavissa rakennusten EnerKey-energianhallintajärjestelmistä tunnin tarkkuudella. Suomen pilottikohteissa on myös sähkön alamittauksia. Pilottikohteiden sähkön alamittauksista on kuitenkin saatavilla vain kuukausitasoista tietoa, kuten esimerkiksi kauppakeskuksen toimitilakohtaisista sähkön alamittauksista. Suomen pilottikohteissa ei ole kaukolämmön alamittauksia.

Asuinkerrostalon sähkönkulutus jakaantuu muista Suomen pilottikohteista poiketen huoneisto- ja kiinteistösähkön kesken. Huoneistosähkön mittauksen tapahtuessa asuntokohtaisesti omien sähkömittareiden kautta ainoastaan kiinteistösähkön mittautieto on rakennuksesta saatavilla. Näin ollen kysyntäjoustotoimenpiteiden on asuinkerrostalossa kohdistuttava

sähkökuormien osalta rakennuksessa oleviin lämmitys-, valaistus-, ja ilmanvaihtokuormiin vertailukelpoisen mittaustiedon saamiseksi. Suomen pilottikohteiden sähkönkulutus lasketaan summamittauksena rakennuksen EnerKey-energianhallintajärjestelmän sähkön päämittaustiedoista.

Suomen pilottikohteiden kaukolämmön kulutusta mitataan kaikissa kohteissa kokonaisuutena eri käyttökohteisiin erittelemättä. Kaukolämmön kulutus määritetään rakennuksen lämmönjakokeskuksen läpi virranneen nesteen massan, ominaislämpökapasiteetin ja lämpötilaeron perusteella. Lämpömäärälaskin laskee kiinteistön kuluttaman kaukolämpöenergian virtausanturilta saatavan massavirran sekä kaukolämmön meno- ja paluuputken lämpötila-antureilta saatavien lämpötilojen perusteella. [140] Suomen pilottikohteiden kaukolämmön kulutus lasketaan sähkönkulutuksen tavoin summamittauksena rakennuksen EnerKey-energianhallintajärjestelmän kaukolämmön päämittaustiedoista.

4.7 Energiakustannuksien laskenta

Suomen pilottikohteiden energiakustannuksien laskennassa tarkastellaan vain niiden sähkön ja kaukolämmön kulutuksesta aiheutuvia kustannuksia. Tutkimuksessa ei huomioida vedenkulutuksesta tai muista kiinteistön huollosta tai kunnossapidosta aiheutuvia kustannuksia. Yksityiskohtaisen laskutuksen ollessa luottamuksellista tietoa pilottikohteiden energiakustannuksien laskennassa käytetään kaukolämpö- ja sähkötariffeista julkista tietoa. Kaukolämmön kohdalla pilottikohteiden energiakustannuksien laskennassa tarvitaan tietoa kaukolämmön energiamaksuista, kulutetusta kaukolämpöenergiasta ja kaukolämmön teho- eli vesivirtamaksusta. Taulukossa 8 on esitetty Suomen pilottikohteiden energiakustannuksien laskennassa ja niiden yhdenmukaisessa vertailussa käytettäviä kaukolämmön energiamaksuja.

Taulukko 8. Kaukolämmön energiamaksujen hinnasto Suomen pilottikohteissa, ALV 24 % [141].

Kausi	Aikaväli	Energiamaksu [€/MWh]
Kesäkausi, 2018	1.5.2018 - 30.9.2018	37,56
Syyskausi, 2018	1.10.2018 - 31.12.2018	68,99
Talvikausi, 2018	1.1.2019 - 28.2.2019	73,59
Kevätkausi, 2019	1.3.2019 - 30.4.2019	71,23
Kesäkausi, 2019	1.5.2019 - 30.9.2019	37,01

Kaukolämmön vesivirtamaksu määräytyy pilottikohteiden kaukolämpöliittymän sopimusvesivirran perusteella. Sopimusvesivirta lasketaan yhtälön 1 avulla rakennuksessa tarvittavan kaukolämpövesivirran mukaan. Kauppakeskuksen ja toimistorakennuksen sopimusvesivirran laskennassa käytetään kaukolämmön meno- ja paluuvien välisenä lämpötila-erona lämmönsiirtimien mitoituslämpötilojen perusteella 82 celsiusastetta ja asuinkerrostalon 72 celsiusastetta. Suomen pilottikohteiden kaukolämmön vesivirtamaksu määritetään kaukolämpöyhtiön hinnastosta laskettua sopimusvesivirtaa suuremman sopimusvesivirran mukaisesti.

$$q_v = \frac{\Phi}{c_p \rho (T_m - T_p)} \quad (1)$$

Kaukolämpöveden jäähtymällä on huomattava vaikutus asiakkaan laitteiston läpi virtaavan veden määrään ja siten myös kaukolämpöyrityksen kustannuksiin, sillä: i) kaukolämpöputkien mitoitus perustuu veden virtaamaan, ii) veden virtaama vaikuttaa kaukolämpöveden pumppauskustannuksiin ja iii) kaukolämmöntuotannon kokonaistehokkuus on riippuvainen kaukolämpöveden paluulämpötilasta. Esimerkiksi kaukolämpöveden jäähtymän puolittuminen kasvattaa tarvittavan vesivirran määrän kaksinkertaiseksi. [142]

Suomen pilottikohteiden kaukolämmön sopimusteho ja kuormitushuippu määritetään vuodenaikaisista kaukolämmön päämittaustiedoista kolmen peräkkäisen tunnin kaukolämmön kulutuksen suurimmasta keskiarvosta yhtälön 2 mukaan. Kaukolämpöyrityksissä käytetään yleensä samanlaista menetelmää kaukolämmön sopimustehon tarkistamisen osalta, minkä avulla pyritään eliminoidaan suuresta lämpimän käyttöveden kulutuksesta aiheutuvia kaukolämmön tehohuippuja [142].

$$\Phi = \max_{t \in T} \left(\frac{Q_{t-1} + Q_t + Q_{t+1}}{3\Delta t} \right) \quad (2)$$

Sähkön osalta pilottikohteiden energiakustannuksien laskennassa tarvitaan tietoa kulutetusta sähköenergiasta, sähkön kuormitushuipusta ja sähkötariffeista. Suomen kaikissa pilottikohteissa on käytössä kiinteähintainen sähkösopimus, jossa sähköenergialla ei ole erillistä perusmaksua. Sähkön siirtomaksu määräytyy pilottikohteen sähköliittymän mukaan. Kauppa-keskuksessa ja toimistorakennuksessa on käytössä keskijännitetelesiirto, joka on tarkoitettu sähköverkkoon 10 kV tai 20 kV jännitetasoilla liittyville kohteille. Asuinkerrostalossa on sen sijaan käytössä pienjännitetelesiirto. Taulukossa 9 on esitetty Suomen pilottikohteiden energiakustannuksien laskennassa ja niiden yhdenmukaisessa vertailussa käytettävien sähkötariffien yksityiskohtaisia tietoja.

Taulukko 9. Suomen pilottikohteiden sähkötariffit, ALV 24 % [143, 144].

Sähkö-tariffi	Perus-maksu [€/kk]	Energia-maksu [c/kWh]	Siirto-maksu [c/kWh]	Teho-maksu [€/kW, kk]	Loisteho-maksu [€/kvar, kk]	Sähkö-vero [c/kWh]
Yleissähkö	0,00	7,97	-	-	-	-
Pienjännite-telesiirto	32,24	-	2,06 talvipäivä 1,09 muu aika	5,58	2,84	2,79
Keskijännite-telesiirto	217,00	-	1,75 talvipäivä 0,78 muu aika	4,56	2,84	2,79

Talvipäivän siirtomaksu on voimassa joului-, tammi- ja helmikuussa maanantaista perjantaihin klo 07 - 21. Muina aikoina voimassa on muun ajan siirtomaksu. Tehomaksu on voimassa vuoden kaikkina kuukausina. Laskutusteho on kuukauden suurin mitattu tunnin keskiteho aikavälillä maanantaista perjantaihin klo 07 - 21. [144] Suomen pilottikohteiden laskutusteho ja sähkön kuormitushuippu lasketaan kyseisen aikavälin sähkön päämittaustiedoista yhtälön 3 avulla:

$$P = \max_{t \in T} \frac{W_t}{\Delta t} \quad (3)$$

Loistehomaksua maksetaan sähköverkkoyhtiön määrittämän ilmaisosuuden ylittävästä loissähköstä. Loistehomaksun tarkoituksena on tehotariffiasiakkaiden loissähkön käytön ohjaaminen, jotta sähkö- ja asiakasverkon liittymiskohta pysyy optimaalisella toiminta-alueella. [145] Loistehon oton laskutusteho on kuukauden suurin mitattu loistehon ottoteho, josta on vähennetty 40 prosenttia saman kuukauden suurimmasta mitatusta päätötehosta tai vähintään 50 kvar. Loistehon annon laskutusteho on kuukauden suurin mitattu loistehon antoteho, josta on vähennetty 10 prosenttia saman kuukauden suurimmasta mitatusta päätötehosta. [144] Pilottikohteiden oman loistehon kompensointilaitteiston ansiosta ei sähköverkkoyhtiön määrittämää loissähkön ilmaisosuutta kuitenkaan ylitetä. Näin ollen Suomen pilottikohteiden energiakustannuksien laskennassa ei loistehomaksua tarvitse huomioida lainkaan.

4.8 Sisäympäristön laadun varmistaminen

Suomen pilottikohteissa suoritettavien kysyntäjoustotoimenpiteiden myötä varmistetaan rakennuksissa riittävän hyvä sisäilman laatu ja miellyttävä lämpötila sisäympäristöön liittyvien mittauksien avulla. Suomen pilottikohteiden sähkö- ja lämpökuormien ohjauksen vaihtuessa olennaisesti loppukäyttäjien viihtyvyyteen ja terveyteen rakennusten asuin- ja yhteistilojen käytettävyyttä seurataan muun muassa sisäilman lämpötilaa, hiilidioksidipitoisuutta ja suhteellista kosteutta mittaamalla. Suomen pilottikohteissa arvioidaan asuin- ja yhteistilojen käytettävyyttä soveltuvin osin HOLISDER-projektissa määriteltyjen suorituskymittareiden avulla. Rakennusten sisäilman suhteelliselle kosteudelle projektissa ei ole kuitenkaan asetettu mitään tarkkoja arviointikriteerejä. Rakennuksen asuin- ja yhteistiloissa on sisäilman suhteellinen kosteus tosin suositeltavaa pitää alle 60 prosentissa [133].

Suomen pilottikohteissa suoritettavien kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutuksia rakennusten sisäilman lämpötilaan arvioidaan KPI-yhtälöiden 4 ja 5 avulla kategoriasta viihtyvyys [29]. PMV-indeksillä arvioidaan ennustettua keskimääräistä mielipidettä, ja PPD-indeksillä puolestaan ennustettua tyytymättömien osuutta loppukäyttäjien keskuudessa. Hyväksyttävässä sisäympäristössä vaihtelee PMV-indeksin arvo -0,5 ja +0,5 välillä sekä PPD-indeksin arvo 0 ja 10 välillä [146]. Suomen pilottikohteiden asuin- ja yhteistilojen lämpöviihtyvyyden arvioinnissa käytetään taulukossa 10 esitettyä arviointiasteikkoa.

Taulukko 10. Lämpöviihtyvyyden arviointiasteikko [146].

PMV-indeksi	Kuvaus
+3	kuuma
+2	lämmin
+1	hieman lämmin
0	neutraali
-1	hieman viileä
-2	viileä
-3	kylmä

Suomen pilottikohteiden asuin- ja yhteistilojen lämpöviihtyvyyden arvioimiseksi on PMV-indeksin laskennassa käytettävä tuntemattomista muuttujista tiettyjä oletusarvoja. Esimerkiksi yhtälöissä 4 ja 6 käytetään PMV-indeksin laskemisen yksinkertaistamisen vuoksi ulkoisen työn oletusarvona nollaa sekä ympäröivien pintojen keskimääräisenä säteilylämpötilana samaa arvoa sisäilman lämpötilan kanssa. Tämä ei kuitenkaan anna tarkkaa arviota loppukäyttäjien kokemasta paikallisesta lämpöviihtyvyydestä kylmien pintojen, kuten esimerkiksi ikkunoiden tai ulkoseinän, läheisyydessä. PMV-indeksin laskennassa on muiden tuntemattomien muuttujien oletusarvoina käytetty seuraavia arvoja: $M = 69,78 \text{ W/m}^2$ (1,2 MET), $I_{cl} = 0,155 \text{ (m}^2\text{K)/W}$ ja $v_a = 0,2 \text{ m/s}$ [29, 147].

$$\begin{aligned}
 PMV = & (0,303e^{-0,036M} + 0,028) \left((M - W_e) \right. \\
 & - 0,00305(5733 - 6,99(M - W_e) - p_a) \\
 & - 0,42((M - W_e) - 58,15) - 0,000017M(5867 - p_a) \\
 & - 0,0014M(34 - T_a) \\
 & - 0,0000000396((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) \\
 & \left. - f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a) \right)
 \end{aligned} \quad (4)$$

$$PPD = 100 - 95e^{-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2} \quad (5)$$

, missä

$$\begin{aligned}
 T_{cl} = & 35,7 - 0,028(M - W_e) \\
 & - I_{cl}(0,0000000396((T_{cl} + 273)^4 - (T_r + 273)^4) \\
 & + f_{cl}h_c(T_{cl} - T_a))
 \end{aligned} \quad (6)$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645I_{cl} \quad (7)$$

$$h_c = \max \left(\frac{2,38|T_{cl} - T_a|^{0,25}}{12,1\sqrt{v_a}} \right) \quad (8)$$

$$p_a = \frac{\varphi}{100} \times 10^5 e^{\frac{11,78(T_a - 99,79)}{T_a + 229,85}} \quad (9)$$

Suomen pilottikohteissa suoritettavien kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikuttaessa olennaisesti myös sisäilman laatuun käytetään rakennusten asuin- ja yhteistilojen hiilidioksidipitoisuustasojen arvioinnissa KPI-yhtälöä 10 kategoriasta ympäristö [29]. Suomen pilottikohteiden asuin- ja yhteistilojen hiilidioksidipitoisuustasoilla seurataan niiden käytettävyyttä suhteessa kyseisen tilan kokonaiskäyttöaikaan.

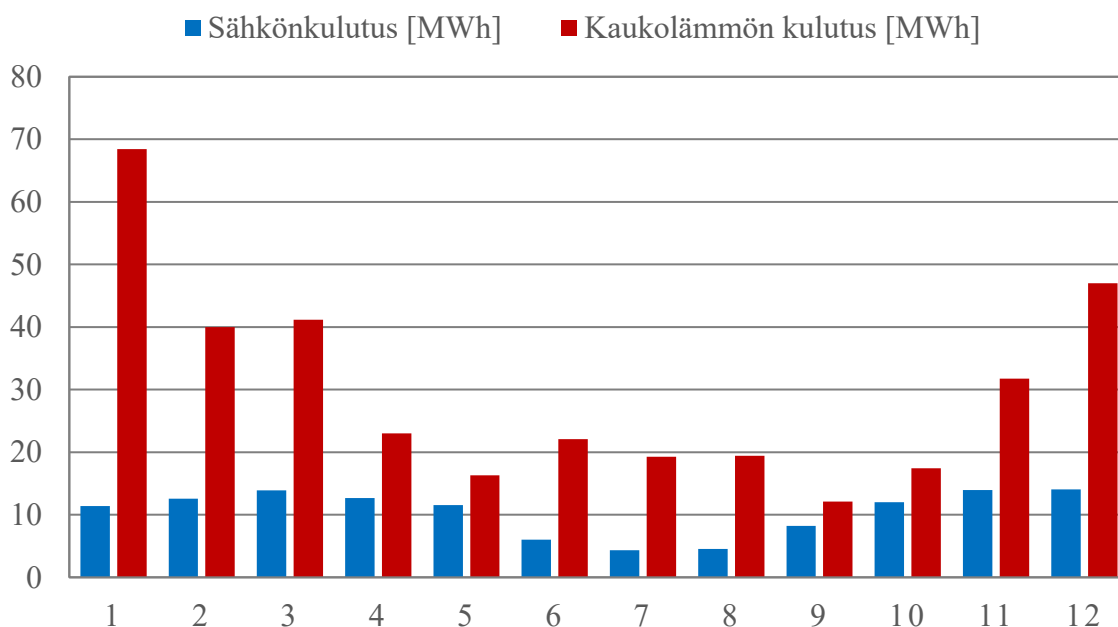
$$t_{CO_2}^i = \left(\frac{\frac{t_I^i}{t_{occ}}}{\frac{t_{II}^i}{t_{occ}}} \times \frac{\frac{t_{III}^i}{t_{occ}}}{\frac{t_{IV}^i}{t_{occ}}} \right) \times 100 \% \quad (10)$$

5 Tutkimustulokset

Kysyntäjoustopotentiaalin määrittämiseksi ja kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutuksien arvioimiseksi tutkimuksessa vertaillaan asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen: i) sähkön ja kaukolämmön kulutusta, ii) sähkön ja kaukolämmön kuormitushuippuja sekä iii) energiakustannuksia. Asuinkerrostalon lähtötilanteen määrittämiseksi on vuodenpituisesta tarkasteluajanjaksoa analysoitu ennen kysyntäjoustojärjestelmän käyttöönottoa. Asuinkerrostalon lopputilanne on määritetty sen sijaan vuorokaudenpituiselta tarkasteluajanjaksolta kysyntäjoustojärjestelmän käyttöönoton jälkeen. Asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen määrittämisessä on hyödynnetty niin rakennuksen EnerKey-energianhallintajärjestelmästä saatavia sähkön ja kaukolämmön päämittaustietoja kuin myös julkista tietoa sen kaukolämpö- ja sähkötariffeista. Yhdenmukaisen vertailun suorittamiseksi asuinkerrostalon lopputilannetta vertaillaan lähtötilanteen vastaavanlaiseen tarkasteluajanjaksoon nähden.

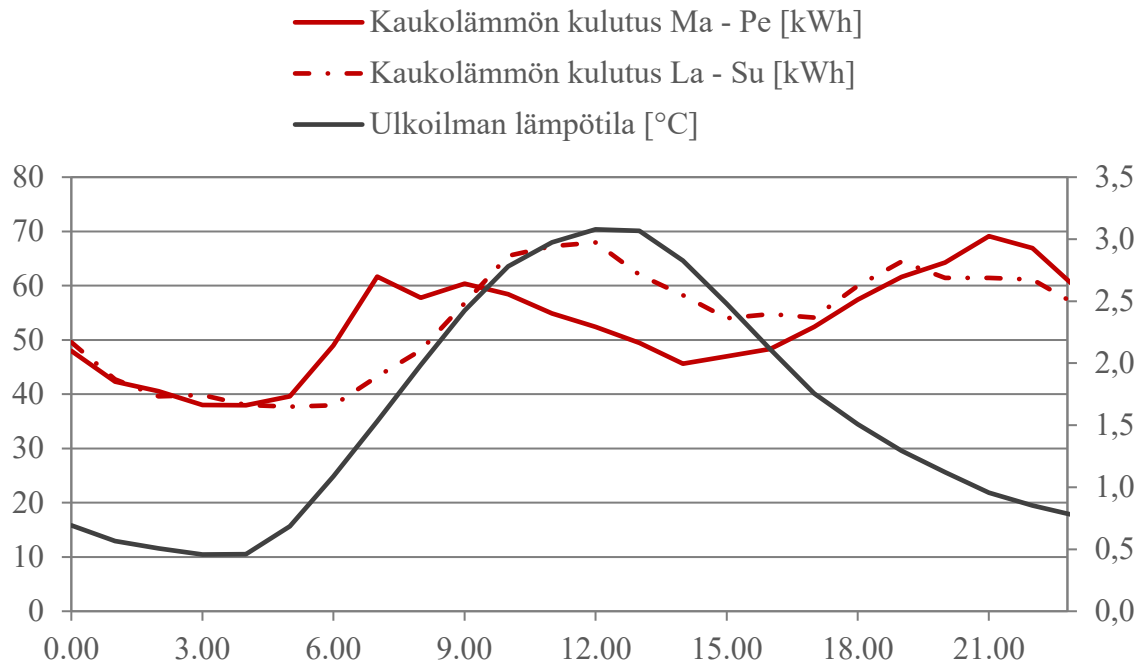
Asuinkerrostalon lähtötilanne on määritetty aikaväliltä 1.7.2018 - 30.6.2019. Asuinkerrostalon lähtötilanteen määrittämiseksi on rakennuksen sähkön ja kaukolämmön kulutus selvitetty tunnin tarkkuudella EnerKey-energianhallintajärjestelmästä saatavien päämittaustietojen avulla. Loppukäyttäjien käyttäytymisen vaikuttaessa viikonpäivän mukaan energiankulutukseen on kaukolämmön kulutus jaoteltu kahteen eri osaan rakennuksen käyttöajan yhtenäisyydestä huolimatta. Asuinkerrostalon kuukausittainen sähkön ja kaukolämmön kulutus on esitetty kuvassa 13 vuodenpituisen tarkasteluajanjakson mittaustietojen perusteella. Kuvassa 14 on esitetty asuinkerrostalon keskimääräinen kaukolämmön kulutus ja ulkoilman lämpötila vuorokauden aikana lämmityskaudella, sekä keskimääräinen sähkönkulutus vuorokauden aikana lämmityskaudella kuvassa 15.

ASUINKERROSTALON ENERGIANKULUTUS



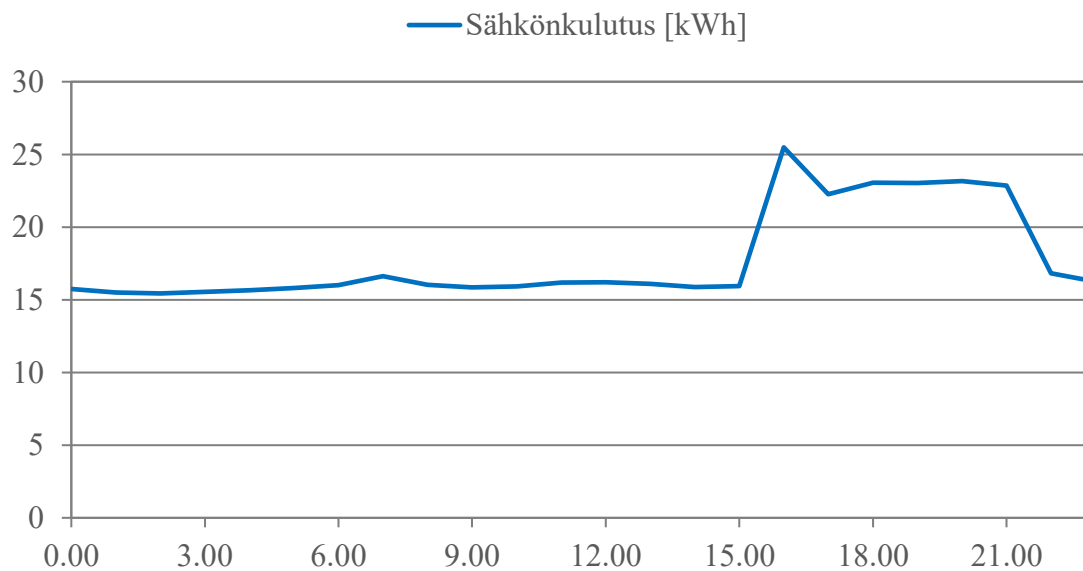
Kuva 13. Asuinkerrostalon kuukausittainen sähkön ja kaukolämmön kulutus vuoden aikana.

ASUINKERROSTALON KAUKOLÄMMÖN KULUTUS JA ULKOILMAN LÄMPÖTILA



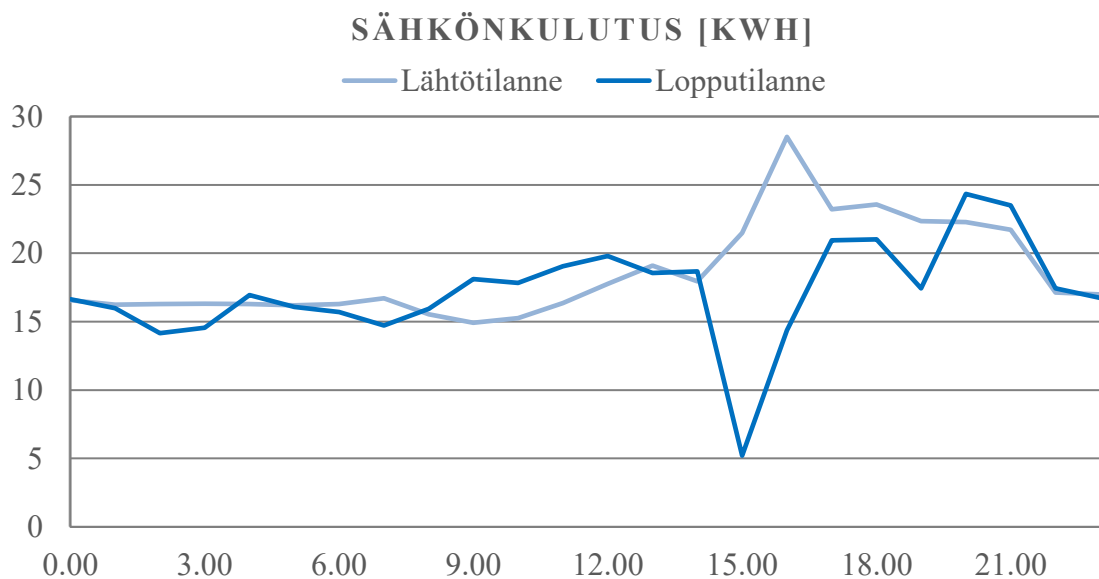
Kuva 14. Asuinkerrostalon keskimääräinen kaukolämmön kulutus ja ulkoilman lämpötila vuorokauden aikana lämmityskaudella.

ASUINKERROSTALON SÄHKÖNKULUTUS

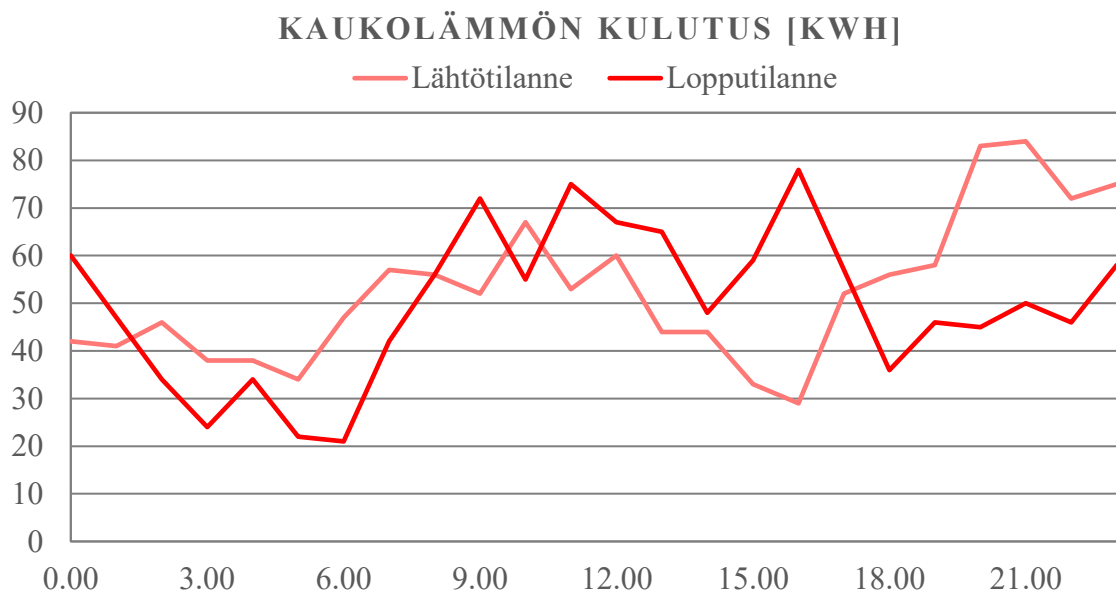


Kuva 15. Asuinkerrostalon keskimääräinen sähkönkulutus vuorokauden aikana lämmityskaudella.

Asuinkerrostalon lopputilanne on määritetty vuorokauden 16.3.2020 sähkön ja kaukolämmön päämittaustietojen avulla. Asuinkerrostalon lopputilanteessa on rakennuksen sähkö- ja lämpökuormia ohjattu aikataulutuksen avulla luvussa 4.4 esitettyjen kysyntäjoustotoimenpiteiden mukaan. Yhdenmukaisen vertailun suorittamiseksi on asuinkerrostalon lopputilannetta vertailtu lähtötilanteen vastaavanlaisen tarkasteluajanjakson sähkön ja kaukolämmön päämittaustietoihin sekä niiden perusteella määritettyihin sähkön ja kaukolämmön kuormitushuippuihin ja laskettuihin energiakustannuksiin nähden. Tutkimustuloksien havainnollistamiseksi on asuinkerrostalon lopputilanteen vertailukohtana käytetty lähtötilanteen tarkasteluajanjakson vuorokautta 25.3.2019. Kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutuksien arvioimiseksi on asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen sähkönkulutus vuorokauden aikana esitetty kuvassa 16 ja kaukolämmön kulutus kuvassa 17.



Kuva 16. Asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen sähkönkulutus.



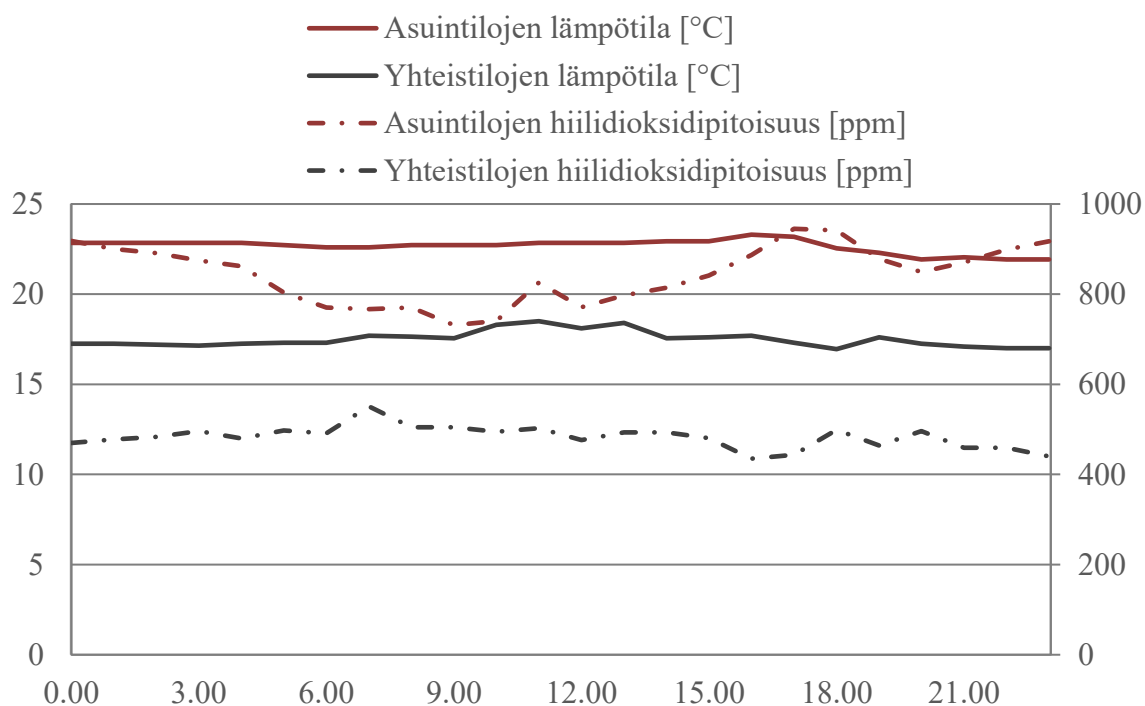
Kuva 17. Asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen kaukolämmön kulutus.

Asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen sähkön ja kaukolämmön kuormitushuipun määrittämisessä sekä energiakustannuksien laskennassa on hyödynnetty vuorokaudenaikaisia sähkön ja kaukolämmön päämittaustietoja sekä julkista tietoa rakennuksen kaukolämpö- ja sähkötariffeista. Asuinkerrostalon sähkö- ja kaukolämpösopimuksen perus- ja tehomaksu on myös approksimoitu vastaamaan vuorokausitason maksuja. Asuinkerrostalon vertailtavien lähtö- ja lopputilanteen energiankulutusta, sähkön ja kaukolämmön kuormitushuippua sekä energiakustannuksia on esitetty taulukossa 11.

Taulukko 11. Asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen energiankulutus, sähkön ja kaukolämmön kuormitushuippu sekä energiakustannukset.

Asuin- kerrostalo	Energiankulutus		Kuormitushuippu		Energiakustannukset	
	Sähkö [kWh]	Kaukolämpö [kWh]	Sähkö [kW]	Kaukolämpö [kW]	Sähkö [€]	Kaukolämpö [€]
Lähtö- tilanne	445,04	1261,00	28,51	79,67	58,91	109,83
Loppu- tilanne	413,75	1197,00	24,34	69,00	54,45	105,27

Asuinkerrostalon lämmitystä ja ilmanvaihdon tehoa rajoitettaessa on suoritettavien kysyntäjoustotoimenpiteiden aikana rakennuksen asuin- ja yhteistilojen käytettävyyden seuraaminen myös erityisen tarpeellista. Kysyntäjoustotoimenpiteiden aikana on rakennuksen asuin- ja yhteistilojen sisäilman laatua ja lämpötilaa seurattu sisäympäristöön liittyvien mittauksien avulla. Kysyntäjoustotoimenpiteiden aiheuttamia vaikutuksia rakennuksen asuin- ja yhteistilojen sisäilman lämpötilaan ja hiilidioksidipitoisuuteen on esitetty kuvassa 18.



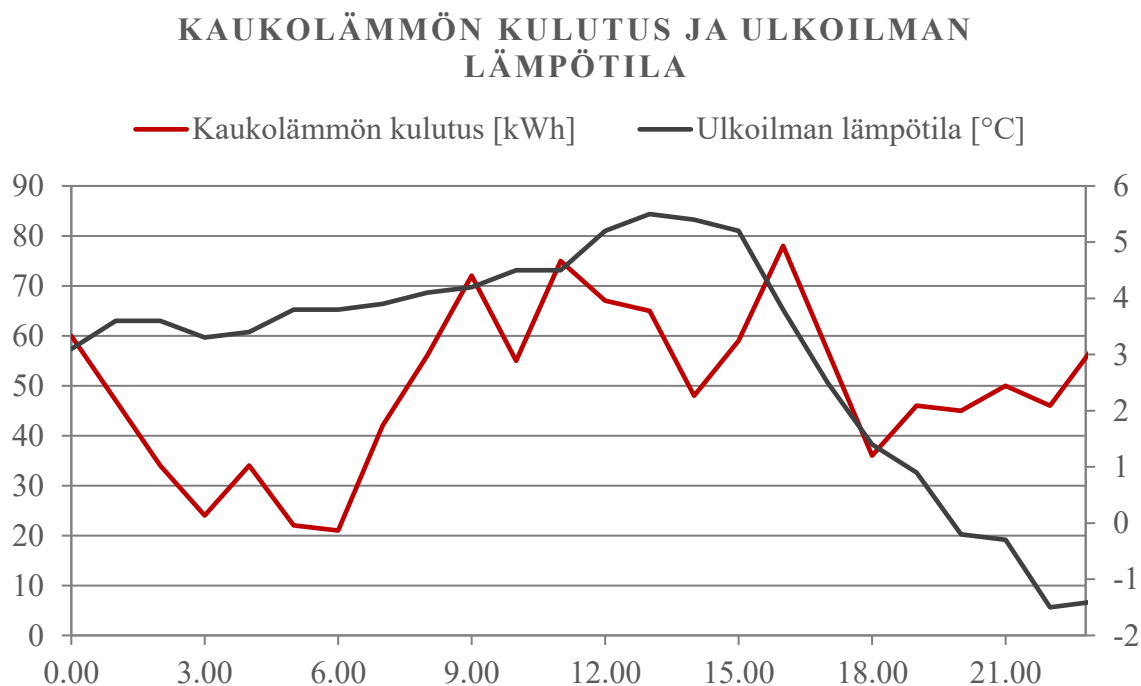
Kuva 18. Asuinkerrostalon lopputilanteen keskimääräinen sisäilman lämpötila ja hiilidioksidipitoisuus rakennuksen asuin- ja yhteistiloissa.

Asuinkerrostalossa suoritettujen kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikuttaessa erityisesti loppukäyttäjien viihtyvyyteen ja terveyteen on KPI-yhtälöiden 4, 5 ja 10 avulla arvioitu lopputilanteen tarkasteluajanjaksolta rakennuksen asuin- ja yhteistilojen lämpöviihtyvyyttä ja hiilidioksidipitoisuustasoa. Taulukossa 12 on esitetty rakennuksen asuin- ja yhteistilojen arvioitua lämpöviihtyvyyttä sisäilman lämpötilan alentamisen aikana sekä käyttöaikaa hiilidioksidipitoisuustasoilla I - IV lopputilanteen tarkasteluajanjakson aikana.

Taulukko 12. Rakennuksen asuin- ja yhteistilojen arvioitu lämpöviihtyvyys ja käyttöaika hiilidioksidipitoisuustasoilla I - IV asuinkerrostalon lopputilanteen tarkasteluajanjakson aikana.

Asuin- kerrostalo	Lämpötila		Hiilidioksidipitoisuus			
	PMV-indeksi [-]	PPD-indeksi [-]	t_I^I [%]	t_{II}^I [%]	t_{III}^I [%]	t_{IV}^I [%]
Asuintilat	-0,05	5,05	29	71	0	0
Yhteistilat	-1,11	31,19	100	0	0	0

Tutkimustuloksien yhdenmukaisen vertailun suorittamiseksi asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen tarkasteluajanjaksoilta on kannattavaa selvittää myös rakennuksen vedenkulutus ja ulkoilman keskilämpötila. Esimerkiksi asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen tarkasteluajanjaksojen aikaisella ulkoilman keskilämpötilalla on suoranainen vaikutus rakennuksen kaukolämmön kulutukseen. Asuinkerrostalon sijaitessa lähellä sääasemaa on ulkoilman lämpötila määritetty Ilmatieteen laitokselta saatavien mittaustietojen perusteella. Asuinkerrostalon lopputilanteen ulkoilman lämpötilaa on esitetty kuvassa 19 yhdessä kaukolämmön kulutuksen kanssa.



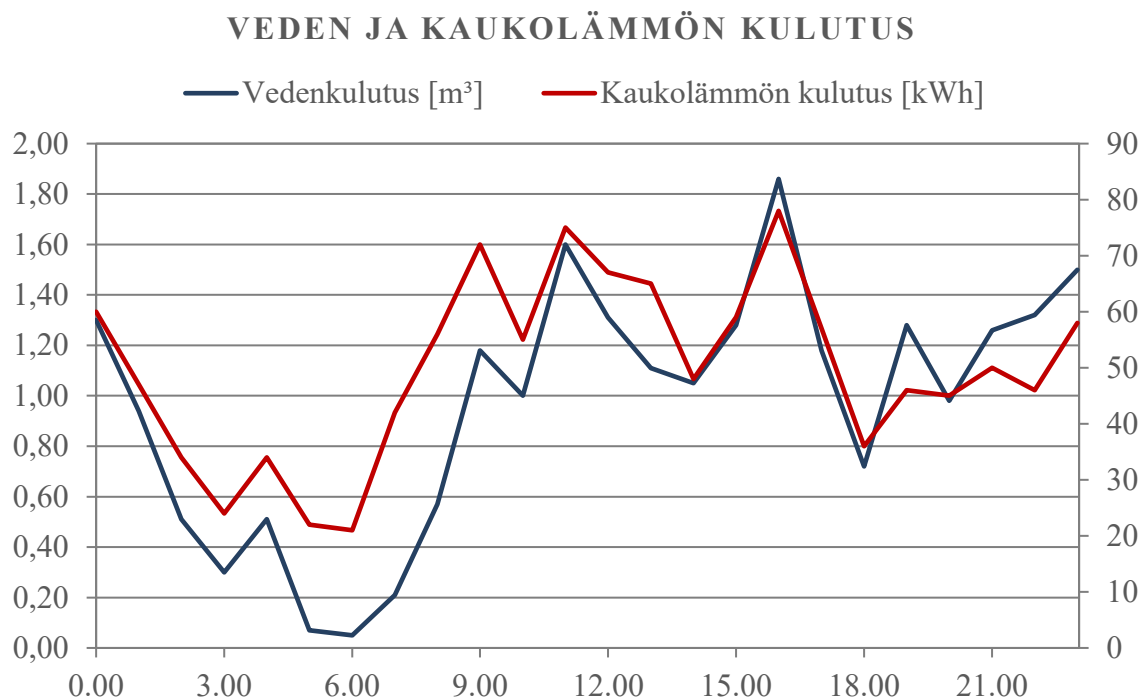
Kuva 19. Asuinkerrostalon lopputilanteen kaukolämmön kulutus ja ulkoilman lämpötila.

Asuinkerrostalon vedenkulutus saadaan laskettua sähkön ja kaukolämmön tavoin rakennuksen EnerKey-energianhallintajärjestelmästä saatavien päämittaustietojen avulla tunnin tarkkuudella. Loppukäyttäjien käyttäytymisen osalta on rakennuksen vedenkulutuksen mittaaminen kannattavaa lämpimän käyttöveden kulutuksesta aiheutuvien kaukolämmön kuormitushuippujen tunnistamista varten. Taulukossa 13 on esitetty asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen ulkoilman keskilämpötila ja vedenkulutus.

Taulukko 13. Ulkoilman keskilämpötila ja vedenkulutus asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen tarkasteluajanjaksojen aikana [148].

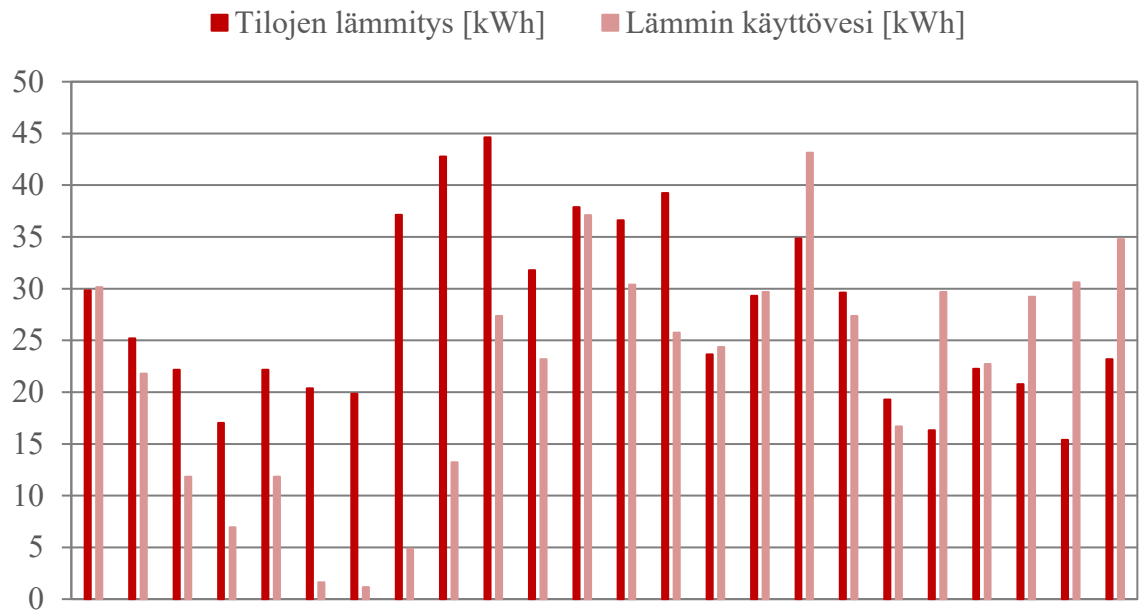
Tarkasteluajanjakso	Ulkoilman keskilämpötila [°C]	Vedenkulutus [m ³]
25.3.2019	1,05	22,45
16.3.2020	3,01	23,09

Asuinkerrostalon vedenkulutuksesta on lämpimän käyttöveden osuus yleensä keskimäärin noin 40 prosenttia, mikä kerrottaessa 0,058 MWh/m³:lla saadaan lämpimän käyttöveden valmistukseen käytettävä lämpöenergia laskettua [149]. Asuinkerrostalon lämmityksessä hyödynnettäessä kaukolämmön ohella myös PILP-järjestelmää ja lämminvesivaraajaan varastoitua lämpöenergiaa on tilojen lämmitykseen käytettävä lämpöenergia määritetty vähentämällä rakennuksen kaukolämmön kulutuksesta lämpimän käyttöveden osuus. Asuinkerrostalon lopputilanteen veden ja kaukolämmön kulutus on esitetty kuvassa 20 sekä tilojen lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden kulutukseen käytettävä lämpöenergia vuorokauden aikana kuvassa 21.



Kuva 20. Asuinkerrostalon lopputilanteen veden ja kaukolämmön kulutus.

ENERGIANKULUTUKSEN JAKAUTUMINEN



Kuva 21. Asuinkerrostalon lopputilanteen tilojen lämmitykseen ja lämpimän käyttöveden valmistukseen käytettävä lämpöenergia käyttötunneittain (klo 00 - 23) jaoteltuna.

6 Pohdinta

Tutkimustuloksien perusteella kysyntäjousto omaa suurta potentiaalia rakennusten energiakustannuksien vähentämisessä. Kysyntäjoustotoimenpiteiden avulla asuinkerrostalon energiakustannuksia vähennettiin 5,3 prosentilla lähtötilanteeseen nähden. Tämän lisäksi asuinkerrostalon sähkönkulutusta vähennettiin 7,0 prosentilla ja kaukolämmön kulutusta 5,1 prosentilla. HOLISDER-projektin tavoitearvoihin verrattuna on kysyntäjouston potentiaali rakennuksen energiakustannuksien vähentämisessä kuitenkin vielä suhteellisen kaukana. Tutkimustuloksien luotettavuuteen vaikuttaa ensisijaisesti kuitenkin asuinkerrostalon lopputilanteen tarkasteluajanjakson pituus. Mikäli asuinkerrostalon lopputilanteen tarkasteluajanjakson pituus olisi ollut esimerkiksi yksi kuukausi yhden vuorokauden sijasta, olisi kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutus ollut rakennuksen energiakustannuksiin ja energiankulutukseen paremmin havaittavissa sekä vertailukelpoisempaa lähtötilanteeseen nähden. Kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutuksien arviointi kuitenkin jatkuu vielä kyseisessä projektissa tämän diplomityön valmistumisen jälkeenkin.

Asuinkerrostalossa suoritettujen sisäilmamittausten perusteella rakennuksen asuin- ja yhteistilojen sisäilman lämpötilassa, hiilidioksidipitoisuudessa tai suhteellisessa kosteudessa ei havaittu huomattavia vaihteluita tai raja-arvojen ylityksiä kysyntäjoustotoimenpiteiden aikana. Kysyntäjoustotoimenpiteiden aikana ei havaittu myöskään merkittäviä vaihteluita sähköverkon taajuudessa. Kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutus rakennuksen yksittäisen tilan sisäilman lämpötilaan oli suurimmillaan 0,9 celsiusastetta. Rakennuksen asuin- ja yhteistilojen sisäilman suhteellinen kosteus pysyi myös koko ajan 30 - 37 prosentin välillä. Rakennuksen yhteistilojen sisäilman hiilidioksidipitoisuus kasvoi hieman ilmanvaihdon tehon rajoittamisen aikana, mutta ei kuitenkaan haitallisesti loppukäyttäjien terveyden kannalta. Esimerkiksi tilan käyttöaikana on sisäilman hiilidioksidipitoisuus yleensä tavanomaisissa sääoloissa enintään 1200 ppm [150]. Ilmanvaihdon tehon rajoittamisen pitkäaikaisvaikutuksia mahdollisiin mikrobien aiheuttamiin terveyshaittoihin tai rakenteiden kosteusvaurioihin on kuitenkin kannattavaa tutkia jatkossa.

Rakennuksen asuin- ja yhteistilojen ilmanvaihdon tehon rajoittamisen avulla asuinkerrostalon sähkönkulutusta vähennettiin klo 07 - 08 välisenä aikana 11,8 prosentilla. Asuinkerrostalon PILP-järjestelmän sammuttamisella puolestaan pienennettiin saunan esilämmityksestä pääasiassa aiheutunutta sähkön kuormitushuippua 14,6 prosentilla. Asuinkerrostalon lähtötilanteeseen verrattuna myös kaukolämmön kuormitushuippua pienennettiin 13,4 prosentilla. Kaukolämmön kuormitushuipun pienentymiseen vaikuttaa kuitenkin erityisesti asuinkerrostalon vedenkulutus lähtö- ja lopputilanteen tarkasteluajanjaksojen aikana. Asuinkerrostalon veden ja kaukolämmön kulutusta analysoitaessa vähennettiin lämpöenergian kulutusta tilojen lämmityksessä klo 21 - 22 välisenä aikana 1,5 kWh:lla edelliseen käyttötuntiin verrattuna sisäilman lämpötilan alentamisen ansiosta. Sisäilman lämpötila ei ehtinyt toisaalta pudota klo 21 - 22 välisenä aikana asuintiloissa keskimäärin kuin vasta 0,2 celsiusasteella ja yhteistiloissa 0,3 celsiusasteella. Näin ollen asuin- ja yhteistilojen PMV- ja PPD-indeksien arvoissa ei käytännössä tapahtunut juuri mitään muutosta kysyntäjoustotoimenpiteiden aikana vuorokauden muuhun aikaan nähden.

Asuinkerrostalossa suoritettavilla kysyntäjoustotoimenpiteillä on myös muita epäsuoria vaikutuksia rakennuksen energiankulutukseen. Esimerkiksi asuinkerrostalon ilmanvaihdon tehon rajoittaminen klo 07 - 08 välisenä aikana vähentää rakennuksen hetkellistä lämmitystehon tarvetta, mutta samalla myös toisaalta PILP-järjestelmän lämmöntuotantoa poistoilma-

virran pienentyessä. Rakennuksen asuin- ja yhteistilojen ilmanvaihdon tehon rajoittamisen vaikutusta kaukolämmön kulutukseen on kuitenkin vaikeaa määrittää suoraan asuinkerrostalon lähtötilanteeseen vertailemalla lopputilanteen tarkasteluajanjakson pituuden sekä muiden olennaisten tietojen, kuten ulko- ja poistoilmavirtojen, puuttumisen takia.

Asuinkerrostalon PILP-järjestelmän sammuttaminen puolestaan lisää rakennuksen kaukolämmön kulutusta. Esimerkiksi COP:n ollessa 3,0 asuinkerrostalon PILP-järjestelmän sammuttaminen lisää rakennuksen kaukolämmön kulutusta klo 15 - 17 välisenä aikana yhteensä 100 kWh:lla ja energiakustannuksia 2,81 €:lla vähentyneen sähkönkulutuksen sekä pienentyneen sähkön kuormitushuipun aikaansaamista taloudellisista kustannussäästöistä huolimatta. Mikäli PILP-järjestelmän sammuttaminen kestäisi vain tunnin ajan, lisättäisiin rakennuksen energiakustannuksia ainoastaan 1,23 €:lla. PILP-järjestelmän tunnin kestäväää sammuttamista testattaessa havaittiin sen kuitenkin menevän toisinaan häiriötilaan, minkä takia päädyttiin lopuksi tuntia pidempään kestävään kysyntäjoustotoimenpiteeseen.

Tutkimustuloksien luotettavuuden varmistamiseksi on asuinkerrostalon lähtö- ja lopputilanteen tarkasteluajanjaksoilta analysoitava myös mahdollisten ulkoisten tekijöiden vaikutuksia rakennuksen energiankulutukseen, mitä ei ole suoraan sähkön ja kaukolämmön kulutuskäyristä havaittavissa. Esimerkiksi rakennuksen energiankulutukseen vaikuttaa vedenkulutuksen ja ulkoilman lämpötilan lisäksi myös muun muassa mittauslaitteiden tarkkuus, tilojen käyttöaste ja loppukäyttäjien käyttäytyminen. Rakennuksen vedenkulutuksen ja ulkoilman lämpötilan mittaaminen on varsin yksinkertaista, mutta esimerkiksi loppukäyttäjien suorittamien säätö- ja ohjaustoimien seuraaminen ja vertaileminen on suhteellisen vaikeaa toteuttaa. Rakennuksen loppukäyttäjien käyttäytymisen, mittauslaitteiden tarkkuuden tai tilojen käyttöasteiden vaikutusta energiankulutukseen on myös haastavaa arvioida kovinkaan tarkasti. Asuinkerrostalon lopputilanteen tarkasteluajanjakson sijoittuessa samoihin aikoihin Suomen koronavirusepidemian kanssa on mahdollisilla kotikaranteeneilla saattanut olla lisäksi vaikutusta loppukäyttäjien lämpimän käyttöveden kulutukseen ja siten myös rakennuksen kaukolämmön kuormitushuippujen ajankohtiin vuorokauden aikana.

Loppukäyttäjien motivaatiolla on myös olennainen vaikutus rakennusten energiankulutukseen. HOLISDER-projektissa tavoitteena on lisätä loppukäyttäjien motivaatiota sekä tietoisuutta rakennusten energiankulutuksesta ja kysyntäjoustosta erilaisten tiedonantotapojen avulla. Esimerkiksi Suomen pilottikohteissa on loppukäyttäjille järjestetty useita erilaisia työpajoja, jaettu esitteitä ja kerätty palautetta kyselyillä. Loppukäyttäjien käyttäytymiseen on pyritty vaikuttamaan muun muassa tiedonannon ja rakennuksen energiankulutusta vähentävien toimenpide-esimerkkien avulla, kuten esimerkiksi patteritermostaatin asianmukaisella säädöllä, lämpimän käyttöveden tuhlaamisen välttämällä sekä käyttämättömien laitteiden ja tarpeettomien valojen sammuttamisella. Esimerkiksi asuinkerrostalon kaukolämmön kuormitushuippuihin vaikuttaa lähinnä vain loppukäyttäjien lämpimän käyttöveden kulutus ulkoilman lämpötilan ohella. Kauppakeskuksen ja toimistorakennuksen loppukäyttäjien motivoiminen on sen sijaan hieman hankalampaa, sillä työntekijä harvoin saa mitään taloudellista hyötyä rakennuksen energiankulutusta vähentävistä toimenpiteistään.

Tutkimustuloksien luotettavuuteen voi myös vaikuttaa julkisen tiedon hyödyntäminen asuinkerrostalon kaukolämpö- ja sähkötariffeista sekä kaukolämmön sopimusvesivirran määrittäminen ja oletusarvojen käyttäminen PMV-indeksin laskennassa. Esimerkiksi asuinkerrostalon energiakustannuksien laskennassa käytetyn sähkön energiamaksu saattaa olla suhteellisen korkea todenmukaiseen nähden, sillä suuryrityksien sähkösopimuksia yleensä kilpailu-

tetaan ja räätälöidään yritysten tarpeiden mukaan. Asuinkerrostalon todennukainen kaukolämmön sopimusvesivirta saattaa myös olla määritettyä kaukolämmön sopimusvesivirtaa hieman korkeampi. Esimerkiksi asuinkerrostalon kaukolämmön sopimustehon määrittäneiden kuormitushuippujen aikainen ulkoilman keskilämpötila oli rakennuksen lämmitystehontarpeen laskennassa käytettävän paikkakunnan mitoitusulkolämpötilan alapuolella. Lisäksi kaukolämmön meno- ja paluuveden välinen lämpötilaero saattaa myös poiketa kaukolämmön sopimusvesivirran määrittämisessä käytettyjen lämmönsiirtimien todellisista mitoituslämpötiloista. PMV-indeksin laskennassa sen sijaan käytetty oletusarvo ympäröivien pintojen keskimääräisestä säteilylämpötilasta saattaa etenkin vaikuttaa tuloksiin hieman.

7 Johtopäätökset

Kysyntäjouaston taloudellisiin ja ympäristöllisiin hyötyihin nähden on siihen liittyviä tutkimuksia suoritettu liian vähän. Sähkömarkkinarakenteen kehityksen myötä kysyntäjouastossa ollaan siirtymässä kohti reaaliaikaiseen hinnoitteluun perustuvien toteutusmallien laajempaa käyttöä. Ilmastomuutoksen hillitsemiseksi on sähkön tuotantorakenne siirtymässä yhä enemmän uusiutuviin ja joustamattomiin energiamuotoihin. Uusiutuviin energialähteisiin perustuvan tuotantokapasiteetin osuuden kasvaessa on sähköntuotantoa kuitenkin aiempaa haastavampaa ajoittaa tarpeen mukaan korkean kulutuksen ajanhetkiin. Näin ollen tulevaisuuden haasteiden ratkaisemiseksi on kehitettävä sellaisia ratkaisuja, joiden avulla pystytään säätämään tuotantoa tai joustamaan kulutuksessa.

Rakennuksissa kysyntäjouaston tarkoituksena on energiankulutuksen siirtäminen korkean kulutuksen ja hinnan tunneilta edullisempaan ajankohtaan tai energiankulutuksen hetkellinen muuttaminen sähköverkon tehotasapainon hallinnan tarpeisiin niin, että siitä ei aiheudu kohtuutonta haittaa loppukäyttäjien viihtyvyyden kannalta. Uusiutuvan energiantuotannon lisääntyessä ja perinteisen säädettävän energiantuotantokapasiteetin vähentyessä tarvitaan kysyntäjouaston kaltaisia ratkaisuja joustaa energiankulutuksessa. Kysyntäjouaston avulla pystytään muun muassa parantamaan energiaverkkojen luotettavuutta, tehostamaan energiainfrastruktuurin toimintaa, pienentämään kuormitushuippuja sekä vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä ja kalliin huipputuotantokapasiteetin käyttöä. Kysyntäjouaston konkreettisista vaikutuksista on kuitenkin saatavilla hyvin vähän julkista tietoa.

Suomi on yksi edelläkävijöistä kysyntäjouastoinfrastruktuurissa ja sähkömarkkinoiden kehityksessä Euroopassa. Kysyntäjouaston integrointi rakennusten energianhallintajärjestelmiin ja yleistymisen energiainfrastruktuurilla on kuitenkin riippuvainen kysyntäjouastotoimenpiteiden syvällisestä ja kokonaisvaltaisesta ymmärtämisestä tosielämän tilanteissa. Kysyntäjouaston yleistymistä ja loppukäyttäjien aktiivista osallistumista energiainfrastruktuurilla on toistaiseksi lykännyt nykyisen tekniikan, liiketoimintamallien, markkinarakenteiden ja lainsäädännön riittämättömyys. Rakennusten loppukäyttäjien on oltava myös riittävän motivoituneita suorittamaan kysyntäjouastotoimenpiteitä asianmukaisella tavalla, minkä takia heidän tietoisuuttaan rakennuksen energiankulutuksesta ja joustopotentialista on lisättävä hienovaraisesti käyttäjäystävällisiä käyttöliittymiä sekä taloudellisia kannustimia hyödyntämällä.

Sähkön kysyntäjouasto on nykyään jo tunnettu teknologia sähkömarkkinoilla. Suomen teollisuusalan, kuten esimerkiksi teräs- ja paperiteollisuuden, suuria ohjattavia sähkökuormia hyödynnetään jo useilla eri markkinapaikoilla. Markkinapaikoille osallistuminen edellyttää kuitenkin suuria tehoja ja kallista automaatiota. Sähkön kysyntäjouaston potentiaali on korkea myös rakennuksissa lämmityksen, ilmanvaihdon, valaistuksen, jäähdytyksen, kodinkoneiden ja sähköautojen latauksen osalta. Rakennuksissa kannattavimpina sähkön kysyntäjouaston markkinapaikkoina pidetään reservi- ja säätösähkömarkkinoita kuormien suuruudesta ja ohjausmahdollisuuksista riippuen.

Kaukolämmön kysyntäjouaston kehitys on sen sijaan alkuvaiheessa. Kaukolämpöjärjestelmän toimiessa kokonaisuutena pidemmällä aikavälillä kuin sähköjärjestelmä on kaukolämmön kysyntäjouaston hallinta haastavaa. Esimerkiksi lämmityksen lisääminen tai vähentäminen näkyy rakennuksen sisäilman lämpötilassa selvällä viiveellä. Kaukolämmön kysyntäjouaston kehityksen edistämisessä suurena haasteena on muun muassa käytännön esimerk-

kien ja mallinnusten vähäisyys. Kaukolämmön uudenaikaisissa tuotanto-, varastointi-, ja joustoratkaisuissa vaaditaan myös uusia investointeja ja kaukolämpömarkkinoiden kehittämistä.

Kysyntäjoustopotentialin ollessa tuntitasolla asia myös kaukolämmön hinnoittelun pitäisi tapahtua tuntitasolla. Nykyään kaukolämmön energiamaksu pysyy vuorokauden aikana pääsääntöisesti vakiona, jolloin asiakkaille on vaikea tarjota kaukolämmön hintaan perustuvia ohjaussovelluksia. Näin ollen kaukolämpömarkkinoilla pitäisi myös siirtyä tuntipohjaiseen hinnoitteluun, jotta kaukolämmön kysyntäjoustopotentialista voidaan saada enemmän taloudellista hyötyä kaikkien sidosryhmien toimesta. Kaukolämpöyhtiöiden teknisistä ja taloudellisista valmiuksista riippuva kaukolämmön tuntiperusteinen laskutus edistäisi samalla myös kaukolämmön kysyntäjoustopotentialin kehitystä, parantaisi kaukolämpöjärjestelmän kustannustehokkuutta ja lisäisi loppukäyttäjien osallistumista kaukolämmön kysyntäjoustopotentialiin.

HOLISDER-projektissa integroidaan laaja valikoima kehittyneitä teknologioita avoimeen, yhteentoimivaan ja turvalliseen standardipohjaiseen tiedonhallinnan viitekehykseen, minkä tavoitteena on mahdollistaa kokonaisvaltainen kysyntäjoustopotentialin optimointi rakennuksissa ja asuinalueilla. Kokonaisvaltaisen kysyntäjoustopotentialin optimoinnin avulla on projektissa tavoitteena vähentää rakennusten energiakustannuksia, lisätä loppukäyttäjien vaikutusmahdollisuuksia energiapalveluissa sekä edistää rakennusten mahdollisuuksia toimia energiaverkon tasapainottajana. HOLISDER-projektissa on tarkoituksena myös luoda uusia kysyntäjoustopotentialin perustuvia liiketoimintamalleja, joiden tavoitteina on mahdollistaa: i) energiayhtiöiden optimaalinen energianhallinta, ii) aggregaattoreiden toimiminen energiapalveluissa ja iii) loppukäyttäjien energiakustannusten vähentyminen.

Tutkimustuloksien perusteella kysyntäjoustopotentiali omaa huomattavaa potentiaalia rakennusten energiakustannusten vähentämisessä. Kysyntäjoustopotentiali soveltuu hyvin myös tasapainottamaan rakennusten energiankulutusta vuorokauden aikana sekä pienentämään sähkön ja kaukolämmön kuormitushuippuja. Asuinkerrostalossa olisi hyödyllistä tutkia myös pitempikestoisten kysyntäjoustopotentialitoimenpiteiden vaikutuksia rakennuksen energiankulutukseen ja sisäolosuhteisiin. Esimerkiksi arkipäivisin olisi asuinkerrostalossa kannattavaa suorittaa kysyntäjoustopotentialitoimenpiteitä kaukolämmön kuormitushuipun pienentämiseksi klo 20.30 - 22.30 välisenä aikana ja viikonloppuisin klo 10.30 - 12.30 välisenä aikana. Sähkön kuormitushuipun pienentämisen osalta asuinkerrostalossa on riittävää suorittaa kysyntäjoustopotentialitoimenpiteitä klo 16 - 17 välisenä aikana.

Kysyntäjoustopotentiali on kuitenkin määritettävä rakennuksissa aina rakennuskohtaisesti. Kysyntäjoustopotentiali rakennusten energiakustannusten vähentämisessä on riippuvainen muun muassa rakennuksen käyttötarkoituksesta, tilojen käyttöasteista, loppukäyttäjistä, rakennusautomaatiojärjestelmästä sekä kaukolämpö- ja sähkötariffeista. Kysyntäjoustopotentialin määrittämistä varten on kannattavaa selvittää rakennuksen energiankulutuksen ja energiakustannusten suuruus vähintään vuodentakaiselta tarkasteluajanjaksolta, minkä avulla pystytään olennaisesti helpottamaan kysyntäjoustopotentialitoimenpiteiden vaikutusten arviointia lähtötilanteeseen nähden mittatietojen ollessa luotettavampia ja vertailukelpoisempia.

HOLISDER-projektissa kokonaisvaltaisen kysyntäjoustopotentialin mahdollistava tiedonhallinnan viitekehys kerää tietoa useista eri lähteistä. Kokonaisvaltaisessa kysyntäjoustopotentialin optimoinnissa tietoa tarvitaan muun muassa rakennuksen laitteista, energiankulutuksesta, omasta pientuotannosta, energian varastoinnista, energian hinnoista, säästä, joustopo-

tentiaalista ja siirtoverkkojen rajoitteista. Suomen pilottikohteiden osalta olisi niiden rakennusautomaatiojärjestelmiin vielä liitettävä tietoa paikallisesta sääennusteesta sekä lähetettävä Cassandra-tietokantaan reaaliaikaista mittaustietoa rakennusten energiankulutuksesta ja omasta sähkön pientuotannosta tunnin tarkkuudella lämmityksen tehokkaampaa ohjaamista ja joustopotentialin tarkempaa määrittämistä varten.

Suomen pilottikohteiden osallistumista kokonaisvaltaiseen kysyntäjoustoon voisi parantaa myös energian varastoinnin avulla. Esimerkiksi akkuteknologiaa hyödyntämällä pilottikohteiden olisi mahdollista varastoida sähköä myöhempää käyttöä varten. Suomessa sähkövarastojen käyttö on kuitenkin vielä suhteellisen harvinaista, mutta tilanne saattaa lähivuosina muuttua akkuteknologian kehityksen myötä. Sähkövarastoa olisi kannattavaa ladata joko rakennuksen hetkellisen sähkönkulutuksen ylittävän oman sähkön pientuotannon tai sähköyhtiöltä ostettavan edullisen sähkön avulla. Sähkövarastoa olisi tällöin mahdollista hyödyntää sähkön kysynnän pienentämisessä kuormitushuippujen aikana tai sähkömarkkinoilla osallistumisessa ylijäämä sähköä myymällä.

Kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutuksien arvioimiseksi olisi pilottikohteissa kannattavaa myös suorittaa sähkön ja kaukolämmön alamittauksia rakennuksen sisäympäristöön liittyvien mittauksien ohella. Esimerkiksi sähkön alamittauksien avulla olisi mahdollista määrittää entistä tarkemmin kysyntäjoustotoimenpiteiden vaikutus yksittäisiin teknisiin järjestelmiin tai laitteisiin. Kaukolämmön alamittauksien ollessa vielä suhteellisen harvinaisia mitataan kaukolämmön kulutusta rakennuksessa yleensä vain yhtenä kokonaisuutena. Kaukolämmön kysyntäjoustopuolelta olisi kuitenkin kannattavaa suorittaa myös lämmitysverkosto- tai asuntokohtaisia kaukolämmön alamittauksia, mikäli niiden todetaan olevan kustannustehokkaita ratkaisuja.

Asuinkerrostalon nykyisten kaukolämpö- ja sähkötariffien takia rakennuksen energiakustannuksia oli mahdollista kuitenkin vähentää vain sähkön ja kaukolämmön kulutusta pienentämällä tai sähkön kuormitushuippua leikkaamalla. Mikäli sähkön energiamaksu olisi asuinkerrostalossa perustunut sähkön systeemihintaan, olisi myös sähkön käytön ajankohdalla ollut huomattava merkitys. Tämän takia olisi asuinkerrostalossa periaatteessa kannattavaa tutkia myös sähkön systeemihintaan sidonnaisen sähkösopimuksen potentiaalia rakennuksen energiakustannuksien vähentämisessä. Asuinkerrostalon vuodenaikaisten päämittaustietojen perusteella sähkön kuormitushuipun pienentämisellä klo 17 - 22 välisen ajan tasolle rakennuksen energiakustannuksia olisi mahdollista vähentää pienentyvän tehomaksun myötä keskimäärin 48 €/a.

Kaukolämmön kohdalla olisi asuinkerrostalon energiakustannuksia toisaalta mahdollista vähentää kaukolämmön kulutuksen pienentämisen lisäksi myös kaukolämpöliittymän huipputehoa rajoittamalla. Esimerkiksi asuinkerrostalon sisäilman lämpötilaa alennettiin lähes yhdellä celsiusasteella vaikuttamatta huomionarvoisesti loppukäyttäjien viihtyvyyteen rakennuksen suurimman lämmitystehontarpeen aikana. Asuinkerrostalon kaukolämpöliittymän huipputehon rajoittamisessa olisi kuitenkin tarpeellista hyödyntää myös tietoa sääennusteesta seuraavien tuntien lämmitystehontarpeen arvioimiseksi, minkä avulla voidaan välttää jopa alkuperäistä suuremmilta lämmitystehontarpeilta ilman sisäilman lämpötilan alentamistoimenpiteitä. Mikäli kysyntäjoustotoimenpiteiden ansiosta kaukolämmön sopimusvesivirta saadaan alennettua yhdellä tasolla, voidaan asuinkerrostalon energiakustannuksia vähentää 378 €/a.

Suomen pilottikohteiden energiankulutusta ja energiakustannuksia olisi mahdollista vähentää myös energiatehokkaammilla ratkaisuilla ja laitteilla tai teknisten järjestelmien tehokkaammalla ohjauksella. Esimerkiksi asuinkerrostalon valaistuksen ohjauksessa olisi kannattavaa hyödyntää muun muassa läsnäolotunnistimia, himmentimiä ja vakiovalosäätimiä sekä asuntojen lämmityksen ja ilmanvaihdon ohjauksessa kotona/poissa -kytkimiä muiden kysyntäjoustotoimenpiteiden ohella. Asuinkerrostalossa varattavien yhteistilojen, kuten saunan ja kerhohuoneen, ilmanvaihdon tehoa olisi myös hyödyllistä rajoittaa niiden varausaikataulujen mukaisesti.

Tutkimustuloksien perusteella olisi asuinkerrostalossa kannattavaa jättää PILP-järjestelmän sammuttaminen kokonaan pois lisääntyvän kaukolämmön kulutuksen takia ja sen sijaan siirtää sähkötehoa noin 1 kW:lla pienentävä asuin- ja yhteistilojen ilmanvaihdon tehon rajoittaminen klo 16 - 17 väliseen aikaan. Rakennuksen PILP-järjestelmän sammuttamista kannattaa harkita aina tarkkaan voimassa olevien kaukolämpö- ja sähkötariffien perusteella sen avulla saavutettavien taloudellisten kustannussäästöjen maksimoimiseksi. PILP-järjestelmän sammuttamisella saavutettava sähkön kuormitushuipun pienentyminen täytyy olla riittävän suuri kompensoidakseen lisääntyneestä kaukolämmön kulutuksesta aiheutuvia kustannuksia. Mikäli satunnaisia sähkön kuormitushuippuja ei esiintyisi ollenkaan klo 16 - 17 välisen ajan ulkopuolella, olisi pelkällä asuin- ja yhteistilojen ilmanvaihdon tehon rajoittamisella mahdollista vähentää rakennuksen energiakustannuksia noin 111 €/a. Rakennuksen sisäilman alentamisella puolestaan olisi asuinkerrostalon energiakustannuksia mahdollista vähentää noin 47 €/a.

Asuinkerrostalon saunan ollessa käytettävissä päivittäin klo 17 - 22 välisenä aikana olisi nykyisen saunavuoron varausjärjestelmän muuttaminen kannattavaa siten, että saunavuoron varausmahdollisuus päättyisi vuorokautta ennen saunavuoron alkua. Asuinkerrostalon saunan esilämmitys alkaa aina klo 16 siitä huolimatta, vaikka kyseisenä päivänä ei olisi yhtäkään saunavuoroa varattuna. Nykyään saunavuoroja on mahdollista varata aina saunavuoron loppuun asti, minkä takia sauna on myös pidettävä lämpimänä klo 22 saakka. Asuinkerrostalon uusi saunavuoron varausjärjestelmä mahdollistaisi tällöin myös saunan kustannustehokkaamman lämmityksen vuorokauden ensimmäisen ja viimeisen saunavuoron alkamis- ja päättymisajankohdan huomioimalla. Esimerkiksi asuinkerrostalon saunaa ei tarvitsisi alkaa esilämmittämään klo 16, mikäli saunavuoroa ei ole varattuna klo 17 - 18 välisenä aikana.

Saunavuorojen todenmukaista käyttöä olisi kannattavaa myös seurata. Esimerkiksi saunavuoroja saattaa jäädä käyttämättä asukkaan äkillisen kiireen tai vain pelkän unohduksen takia. Nykyään saunavuorojen käytöstä pystytään saamaan tietoa monella eri tavalla, kuten esimerkiksi liiketunnistimen, älylukollisen oven tai saunan lämpötilaa säättävän ohjauskeskuksen avulla. Uudenlaisella saunavuoron varausjärjestelmällä ja saunan lämpötilaa säättävällä ohjauskeskuksella olisi mahdollista myös vähentää rakennuksen sähkönkulutusta alentamalla saunan lämpötilaa aina varaamattomien saunavuorojen aikana. Mikäli saunavuoroja jää käyttämättä tiettyinä ajankohtina erityisen paljon, on kannattavaa myös tutkia vaihtoehtoisen saunavuoron varausaikataulun kannattavuutta.

Lähdeluettelo

1. A. Afram & F. Janabi-Sharifi. Theory and applications of HVAC control systems – A review of model predictive control (MPC). Building and Environment. [Verkkolehti]. Vol: 72. 2014. S. 343-355. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: DOI:10.1016/j.build-env.2013.11.016.
2. European Commission. Sustainable buildings for Europe's climate-neutral future. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.2.2020]. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/easme/en/news/sustainable-buildings-europe-s-climate-neutral-future>.
3. European Commission. Energy performance of buildings directive. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.2.2020]. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-performance-of-buildings/energy-performance-buildings-directive>.
4. R. Ruparathna & K. Hewage & R. Sadiq. Improving the energy efficiency of the existing building stock: A critical review of commercial and institutional buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 53. 2016. S. 1032-1045. [Viitattu 25.2.2019]. ISSN 1364-0321. Saatavissa: DOI:10.1016/j.rser.2015.09.084.
5. P. Kukkonen & J. Hyvärinen & M. Saari et al. Rakennusautomaatio rakentamisen sääntelyssä. [Verkkoaineisto]. 2015. 35 s. [Viitattu 21.3.2019]. Saatavissa: <http://www.stul.fi/Download.ashx?id=e9571810-fe28-4c35-8ce6-5abbc1e6bcca&type=1&attachment=True&version=635832619391030000>.
6. W. Kastner & G. Neugschwandtner & S. Soucek & H. M. Newman. Communication systems for building automation and control. Proceedings of the IEEE. [Verkkolehti]. Vol. 93:6. 2005. S. 1178-1203. [Viitattu 20.2.2019]. ISSN 0018-9219. Saatavissa: DOI:10.1109/JPROC.2005.849726.
7. M. H. Albadi & E. F. El-Saadany. Demand Response in Electricity Markets: An Overview. IEEE Power Engineering Society General Meeting. [Verkkoaineisto]. 2007. S. 1-5. [Viitattu 20.2.2019]. ISSN 1932-5517. Saatavissa: DOI:10.1109/PES.2007.385728.
8. Tekniikka & Talous. Kysyntäjousto voi tuoda isot säästöt sähkölaskuun – pian myös omakotitaloissa 5-10% pudotus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: <https://www.tekniikkatalous.fi/tekniikka/energia/kysyntajousto-voi-tuoda-isot-saastot-sahkolaskuun-pian-mynos-omakotitaloissa-5-10-pudotus-6687760>.
9. N. O'Connell & P. Pinson & H. Madsen & M. O'Malley. Benefits and challenges of electrical demand response: A critical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 39. 2014 S. 686-699. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: DOI:10.1016/j.rser.2014.07.098.
10. Greenpeace. Energia[vallan]kumous – Suomen kestäväen energian näkymät. [Verkkoaineisto]. 2012. 52 s. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: <http://www.greenpeace.org/archive-finland/Global/finland/Dokumentit/2013/EnergiaVallankumous.pdf>.

11. P. Järventausta & S. Repo & P. Trygg et al. Kysynnän jousto – Suomeen soveltuvat käytännön ratkaisut ja vaikutukset verkkoyhtiöille (DR pooli). Tampere, Suomi: Tampereen teknillinen yliopisto. Sähkötekniikan laitos. 2015. 362 s. [Viitattu 20.2.2019]. ISBN 978-952-15-3485-0. Saatavissa: https://tutcris.tut.fi/portal/files/4776899/kysynnan_jousto_loppuraportti.pdf.
12. L. Hirth. The market value of variable renewables: The effect of solar wind power variability on their relative price. Energy Economics. [Verkkolehti]. Vol. 38. 2013. S. 218-236. [Viitattu 20.2.2019]. ISSN 0140-9883. Saatavissa: DOI:10.1016/j.eneco.2013.02.004.
13. O. Bremer & O. Frilander & T. Kaskinen & M. Malho. Kysyntäjousto kuluttajan näkökulmasta. [Verkkoaineisto]. 2017. 37 s. [Viitattu 22.2.2019]. ISBN 978-952-5844-26-9. Saatavissa: <https://www.demoshelsinki.fi/wp-content/uploads/2018/01/kysyntajousto-kuluttajan-nakokulmasta.pdf>.
14. P. Faria & Z. Vale. Demand response in electrical energy supply: An optimal real time pricing approach. Energy. [Verkkolehti]. Vol. 36:8. 2011. S. 5374-5384. [Viitattu 22.2.2019]. ISSN 0360-5442. Saatavissa: DOI:10.1016/j.energy.2011.06.049.
15. P. D. Lund & J. Lindgren & J. Mikkola & J. Salpakari. Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 45. 2015. S. 785-807. [Viitattu 20.2.2019]. ISSN 1364-0321. Saatavissa: DOI:10.1016/j.rser.2015.01.057.
16. P. Siano. Demand response and smart grids - A survey. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 30. 2014. S. 461-478. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: DOI:10.1016/j.rser.2013.10.022.
17. Smart Energy Transition. Energiatohokkuutta ja kysyntäjoustoja päivittäistavarakaupaan ja koko energiasysteemiin. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: <http://smartenergytransition.fi/fi/energiatohokkuutta-ja-kysyntajoustoja-paivittaistavarakauppaan-ja-koko-energiajarjestelmaan/>.
18. H. Pihala & J. Farin & S. Kärkkäinen. Sähkön kysyntäjoustopotentialikartoitus teollisuudessa. [Verkkoaineisto]. 2005. 36 s. [Viitattu 22.2.2019]. Saatavissa: https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/PRO3_P3017_05.pdf.
19. VTT. Säätoivoimaa tulevaisuuden sähkömarkkinalle. [Verkkoaineisto]. 2018. 8 s. [Viitattu 22.2.2019]. Saatavissa: https://www.vtt.fi/inf/pdf/whitepapers/VTWhitePaper2018-Saatovoimaa_tulevaisuuden_sahkomarkkinalle.pdf.
20. I. Vehviläinen & E. Rynänen & M. Hjelt & L. Descombes et al. Energiaviraston valvontamenetelmissä sovellettavan innovaatiokannustimen arviointi. [Verkkoaineisto]. 2014. 46 s. [Viitattu 22.2.2019]. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/documents/11120570/12766832/Raportti-Valvontamenetelmiss%C3%A4-sovellettavan-innovaatiokannustimen-arviointi.pdf/54ce5e1f-1a80-d2d9-c53f-85ca5bdfd936/Raportti-Valvontamenetelmiss%C3%A4-sovellettavan-innovaatiokannustimen-arviointi.pdf.pdf>.

21. Smart Energy Demand Coalition. Empowering Residential and SME Consumers. [Verkkoaineisto]. 2016. 70 s. [Viitattu 25.2.2019]. Saatavissa: <https://www.smarten.eu/wp-content/uploads/2016/10/SEDC-White-Paper-Empowering-Residential-and-SME-Consumers.pdf>.
22. HOLISDER. HOLISDER project has been launched. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2019]. Saatavissa: <http://holisder.eu/holisder-project-has-been-launched/>.
23. Business Finland. Horisontti 2020. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2019]. Saatavissa: <https://www.businessfinland.fi/suomalaisille-asiakkaille/palvelut/rahoitus/horisontti-2020/lyhyesti>.
24. HOLISDER. About the project. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2019]. Saatavissa: <http://holisder.eu/>.
25. HOLISDER. Project. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2019]. Saatavissa: <http://holisder.eu/project/>.
26. HOLISDER. Pilot sites. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2019]. Saatavissa: <http://holisder.eu/project/pilot-sites/>.
27. HOLISDER. D2.1 End-user & business requirements. [Verkkoaineisto]. 2018. 92 s. [Viitattu 4.3.2019]. Saatavissa: http://holisder.eu/reports/HOLISDER_D2.1_End-user_and_business_requirements.pdf.
28. HOLISDER. Living Lab. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2019]. Saatavissa: <http://holisder.eu/living-lab/>.
29. HOLISDER. D2.2. HOLISDER PMV Methodology Specifications. [Verkkoaineisto]. 2018. 62 s. [Viitattu 4.3.2019]. Saatavissa: http://holisder.eu/reports/HOLISDER_D2.2_HOLISDER_PMV_Methodology_Specifications_V1.0.pdf.
30. Mimmi Niemistö. Kysyntäjoustop tutkiminen HOLISDER-pilottikohteissa. Diplomityö. Lappeenranta teknillinen yliopisto, School of Energy Systems. Lappeenranta, 2018. 92 s. [Viitattu 27.3.2019]. Saatavissa: <http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/158880/Kysynt%C3%A4joustop%20tutkiminen.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
31. Teknologiateollisuus. Mistä Suomen kilpailuvaltti uusilla energiamarkkinoilla?. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: <https://teknologiateollisuus.fi/fi/ajankoh-taista/tapahtumat/mista-suomen-kilpailuvaltti-uusilla-energiamarckkinoilla-aalto-design>.
32. Energiavirasto. Reilua energiaa. Energiaviraston sidosryhmälehti 1/2018. [Verkkoaineisto]. 2018. 25 s. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Reilua_Energiaa_1_2018.pdf/7645ba2b-8a43-4503-a3df-6fdae00ed03b.
33. Energiateollisuus. Energiapolitiikka. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/energiateollisuuden_edunvalvonta/energiapolitiikka.

34. Fortum. Fortum Energy Review August 2014. [Verkkoaineisto]. 2014. 26 s. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: http://apps.fortum.fi/gallery/Fortum_Energy_Review_Climate.pdf.
35. S. Syri & A. Vihma & M. Airaksinen & A. Hast et al. Ilmastopaneeli. Suomen ilmasto-paneeli raportti 6/2013. [Verkkoaineisto]. 2013. 45 s. [Viitattu 6.3.2019]. Saatavissa: https://www.ilmastopaneeli.fi/wp-content/uploads/2018/10/ilmastopaneelin_raportti-6_2013.pdf.
36. J. Känkänen & J. Patronen & K. Vilén & J. Saarela. Päästökauppadirektiivin uudistamisen vaikutukset Suomen energiasektoriin ja teollisuuteen. Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 56/2017. [Verkkoaineisto]. 2017. 86 s. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: https://tietokayttoon.fi/documents/10616/3866814/56_Loppuraportti_p%C3%A4%C3%A4st%C3%B6kauppa_.pdf/6711dddb-e1a7-42e1-abc3-889886ca7950?version=1.0.
37. Energiateollisuus ry & Fingrid Oyj. Hyvä tietää sähkömarkkinoista. [Verkkoaineisto]. 2013. 22 s. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/280/hyva_tietaa_sahko-markkinoista_2013.pdf.
38. Energiavirasto. Vuosikertomus 2014. [Verkkoaineisto]. 2014. 28 s. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: http://www.e-julkaisu.fi/energiavirasto/vuosikertomus_2014/pdf/Energiavirasto_vsk2014_FINAL.pdf.
39. Elinkeinoelämän keskusliitto. Päästökaupan uudistaminen. [Verkkoaineisto]. 2015. 22 s. [Viitattu 6.3.2019]. Saatavissa: https://ek.fi/wp-content/uploads/Paastokaupan_uudistaminen_OK.pdf.
40. I. Makkonen. Päästökauppa ja sen vaikutukset sähkön hintaan. [Verkkoaineisto]. 2014. 7 s. [Viitattu 28.3.2019]. Saatavissa: http://www.smts.fi/MTP_julkaisu_2014/Posteri/221Makkonen_Paastokauppa_ja_sen_vaikutukset_sahkon_hintaan.pdf.
41. T. Koljonen & M. Ruska & M. Flyktman & J. Forsström et al. Energiaresurssit ja -markkinat. VTT Tiedotteita 2489. [Verkkoaineisto]. Espoo. 2009. 110 s. ISSN 1455-0865. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2009/T2489.pdf>.
42. M. Ruska & T. Koljonen & G. Koreneff & A. Lehtilä. Fossiiliset polttoainevarat ja -markkinat. VTT Technology 28. [Verkkoaineisto]. Espoo. 2012. 113 s. ISSN 2242-122X. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/technology/2012/T28.pdf>.
43. Tilastokeskus. Energian hinnat. [Verkkoaineisto]. 2018. 11 s. [Viitattu 1.3.2019]. ISSN 1799-7984. Saatavissa: https://www.stat.fi/til/ehi/2018/03/ehi_2018_03_2018-12-12.fi.pdf.
44. E. Vakkilainen & A. Kivistö. Sähkön tuotantokustannusvertailu. Tutkimusraportti 66. [Verkkoaineisto]. Lappeenranta. 2017. 28 s. ISSN 2243-3376. [Viitattu 1.3.2019]. Saatavissa: http://lutpub.lut.fi/bitstream/handle/10024/143861/S%c3%a4hk%c3%b6n%20tuotantokustannusvertailu_ok.pdf?sequence=2&isAllowed=y.

45. Työ- ja elinkeinoministeriö. Energia- ja ilmastotiekartta 2050. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 31/2014. [Verkkoaineisto]. 2014. 75 s. [Viitattu 6.3.2019]. ISBN 978-952-227-882-1. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2628105/Energia-ja-ilmastotie-kartta+2050.pdf/1584025f-c5c7-456c-a912-aba0ee3e5052/Energia-ja-ilmastotie-kartta+2050.pdf.pdf>.
46. Työ- ja elinkeinoministeriö. Valtioneuvoston selonteko kansallisesta energia- ja ilmastostrategiasta vuoteen 2030. Työ- ja elinkeinoministeriön julkaisuja 4/2017. [Verkkoaineisto]. 2017. 119 s. [Viitattu 6.3.2019]. ISBN 978-952-327-190-6. Saatavissa: http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/79189/TEMjul_4_2017_verkkojulkaisu.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
47. S. Proskurina & R. Sikkema & J. Heinimö & E. Vakkilainen. Five years left – How are the EU member states contributing to the 20% target for EU's renewable energy consumption; the role of woody biomass. Biomass and Bioenergy. [Verkkolehti]. Vol. 95. 2016. S. 64-77. [Viitattu 7.3.2019]. ISSN 0961-9534. Saatavissa: DOI:10.1016/j.biombioe.2016.09.016.
48. European Commission. 2020 climate & energy package. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_en.
49. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/29/EY, annettu 23. päivänä huhtikuuta 2009, direktiivin 2003/87/EY muuttamisesta kasviuonekaasujen päästöoikeuksien kauppaa koskevan yhteisön järjestelmän parantamiseksi ja laajentamiseksi. Euroopan unionin virallinen lehti. [Verkkoaineisto]. L 140. 2009. S. 63-87. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0063:0087:FI:PDF>.
50. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2009/28/EY, annettu 23. päivänä huhtikuuta 2009, uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä sekä direktiivien 2001/77/EY ja 2003/30/EY muuttamisesta ja myöhemmästä kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti. [Verkkoaineisto]. L 140. 2009. S. 16-62. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:FI:PDF>.
51. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 2012/27/EU, annettu 25 päivänä lokakuuta 2012, energiatehokkuudesta, direktiivien 2009/125/EY ja 2010/30/EU muuttamisesta sekä direktiivien 2004/8/EY ja 2006/32/EY kumoamisesta. Euroopan unionin virallinen lehti. [Verkkoaineisto]. L 315. 2012. S. 1-56. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0027&qid=1436852577063&from=FI>.
52. Ympäristöministeriö. Euroopan unionin ilmastopolitiikka. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Ymparisto/Ilmasto_ja_ilma/Ilmastonmuutoksen_hillitseminen/Euroopan_unionin_ilmastopolitiikka.
53. Eurostat. Share of renewable energy in gross final energy consumption. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=t2020_31.

54. European Commission. The roadmap for transforming the EU into a competitive, low-carbon economy by 2050. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2019]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/2050_roadmap_en.pdf.
55. A. Aslani & P. Helo & M. Naaranoja. Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: System dynamics approach. Applied Energy. [Verkkolehti]. Vol. 113. 2014. S. 758-765. [Viitattu 7.3.2019]. ISSN 0306-2619. Saatavissa: DOI:10.1016/j.apenergy.2013.08.015.
56. Motiva. Rakentaminen ja rakennukset. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.3.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/julkinen_sektori/kestavat_julkiset_hankinnat/tietopankki/rakentaminen_ja_rakennukset.
57. L. Pérez-Lombard & J. Ortiz & C. Pout. A review on buildings energy consumption information. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 40:3. 2008. S. 394-398. [Viitattu 7.3.2019]. ISSN 0378-7788. Saatavissa: DOI:10.1016/j.enbuild.2007.03.007.
58. T. Hussein & P. Paasonen & M. Kulmala. Activity pattern of a selected group of school occupants and their family members in Helsinki – Finland. Science of The Total Environment. [Verkkolehti]. Vol. 425. 2012. S. 289-292. [Viitattu 8.3.2019]. ISSN 0048-9697. Saatavissa: DOI:10.1016/j.scitotenv.2012.03.002.
59. T. Hong & S. C. Taylor-Lange & S. D'Oca et al. Advances in research and applications of energy-related occupant behavior in buildings. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 116. 2016. S. 694-702. [Viitattu 8.3.2019]. ISSN 0378-7788. Saatavissa: DOI:10.1016/j.enbuild.2015.11.052.
60. Z. Yu & B. C. M. Fung & F. Haghighat et al. A systematic procedure to study the influence of occupant behavior on building energy consumption. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 43:6. 2011. S. 1409-1417. [Viitattu 8.3.2019]. ISSN 0378-7788. Saatavissa: DOI:10.1016/j.enbuild.2011.02.002.
61. Motiva. Kodin energiaopas. [Verkkoaineisto]. 2012. 20 s. [Viitattu 7.3.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/files/10416/Kodin_Energia_Opas.pdf.
62. P. H. Shaikh & N. B. M. Nor & P. Nallagownden et al. A review on optimized control systems for building energy and comfort management of smart sustainable buildings. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 34. 2014. S. 409-429. [Viitattu 8.3.2019]. ISSN 1364-0321. Saatavissa: DOI:10.1016/j.rser.2014.03.027.
63. C. Fisher. Feedback on household electricity consumption: a tool for saving energy?. Energy Efficiency. [Verkkolehti]. Vol. 1:1. 2008. S. 79-104. [Viitattu 6.3.2019]. ISSN 1570-6478. Saatavissa: DOI:10.1007/s12053-008-9009-7.
64. J. Stromback & C. Dromacque & M. H. Yassin. The potential of smart meter enabled programs to increase energy and systems efficiency: a mass pilot comparison. [Verkkoaineisto]. 2011. 92 s. [Viitattu 6.3.2019]. Saatavissa: https://esmig.eu/sites/default/files/2011.10.12_empower_demand_report_final.pdf.

65. Suomen virallinen tilasto (SVT). Rakennukset ja kesämökit 2016. [Verkkoaineisto]. Helsinki. 2016. 15 s. ISSN 1798-677X. [Viitattu 6.3.2019]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/rakke/2016/rakke_2016_2017-05-24_fi.pdf.
66. R. Kyrö & J. Heinonen & A. Säynäjoki & S. Junnila. Occupants have little influence on the overall energy consumption in district heated apartment buildings. *Energy and Buildings*. [Verkkoalehti]. Vol. 43:12. 2011. S. 3484-3490. [Viitattu 6.3.2019]. ISSN 0378-7788. Saatavissa: DOI:10.1016/j.enbuild.2011.09.012.
67. Rakennustieto. Rakennuksen energiatehokkuuden parantaminen luvanvaraisen korjauksen yhteydessä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.3.2019]. Saatavissa: <https://www.rakennustieto.fi/Downloads/RK/RK140102.pdf>.
68. E. Lehtinen & E. Nippala & L. Jaakkonen & H. Nuuttila. Asuinrakennukset vuoteen 2025. [Verkkoaineisto]. Tampere. 2005. 60 s. ISBN 952-5004-59-7. [Viitattu 7.3.2019]. Saatavissa: https://www.vtt.fi/inf/julkaisut/muut/2005/asuinrakennukset_vuoteen_2025.pdf.
69. M. Mattinen & J. Heljo & M. Savolahti. Rakennusten energiankulutuksen perusskenaario Suomessa 2015-2050. Suomen ympäristökeskuksen raportteja 35/2016. [Verkkoaineisto]. 2016. 70 s. [Viitattu 6.3.2019]. ISBN 978-952-11-4644-2. Saatavissa: <https://tem.fi/documents/1410877/2772829/Rakennusten+energiankulutuksen+perusskenaario+Suomessa+2015-2050/7a02bf88-65f0-4069-a547-20c35936e231>.
70. Suomen ympäristökeskus. Rakennuskannan energiankulutus laskee nykytoimilla vain vähän lähivuosikymmeninä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 7.6.2019]. Saatavissa: [https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Rakennuskannan_energiankulutus_laskee_ny\(40563\)](https://www.syke.fi/fi-FI/Ajankohtaista/Tiedotteet/Rakennuskannan_energiankulutus_laskee_ny(40563)).
71. R. Hirvonen & P. Sulamaa & E. Tamminen. Kilpailu sähkömarkkinoilla: Sähkömarkkinoiden keskeiset piirteet ja toiminta. ETLA Discussion Papers, The Research Institute of the Finnish Economy (ETLA), No. 879. [Verkkoaineisto]. 2003. 39 s. [Viitattu 11.3.2019]. ISSN 0781-6847. Saatavissa: <https://www.etla.fi/wp-content/uploads/2012/09/dp879.pdf>.
72. European Commission. EU energy markets in 2014. [Verkkoaineisto]. 2014. 172 s. [Viitattu 11.3.2019]. ISBN 978-92-79-37962-8. Saatavissa: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/2014_energy_market_en_0.pdf.
73. EEN-E3006 Energy Markets – Course material. European electricity markets. Aalto University. [Verkkoaineisto]. 2018. 48 s. [Viitattu 11.3.2019]. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/843642/mod_resource/content/1/SCross_EUElecmarkets%202018.pdf.
74. Energiatieto. Sähkömarkkinat 2030 – visio eurooppalaisista sähkömarkkinoista. [Verkkoaineisto]. 2016. 12 s. [Viitattu 11.3.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/fi-les/629/Sahkomarkkinat_2030_-_visio_taskuesite.pdf.
75. V. Hankalin & L. Sivill & L. Rantanen et al. Selvitys keinoista sähkötehon riittävyyden varmistamiseksi kulutushuipuissa. [Verkkoaineisto]. 2016. 43 s. [Viitattu 12.3.2019].

Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/documents/10191/0/Selvitys+keinoista+s%C3%A4hk%C3%B6tehon+riitt%C3%A4vyys+varmistamiseksi+kulutushuipussa+-Raportti+%2800000004%29.pdf/d3ff1994-7f96-48ab-9123-b2a327635dbe>.

76. E. Rinta-Runsala & J. Kiviniemi. Sähköyhtiön riskienhallinta avoimilla sähkömarkkinoilla. VTT Tiedotteita 2007. [Verkkoaineisto]. Espoo, 1999. 66 s. [Viitattu 12.3.2019]. ISBN 951-38-5624-0. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/1999/T2007.pdf>.

77. Fingrid. Reservit ja säätösähkö. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.3.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/reservit-ja-saatosahko/>.

78. Fingrid. Markkinapaikat. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.5.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/markkinapaikat/>.

79. Fingrid. Kysyntäjousto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 23.5.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/>.

80. H. Huuki & M. Kopsakangas-Savolainen & R. Svento. Reaaliaikaisen hinnoittelun vaikutuksista pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla. Kansantaloudellinen aikakauskirja – 110. vsk. – 2014. [Verkkoaineisto]. 2014. 12 s. [Viitattu 12.3.2019]. Saatavissa: <https://www.taloustieteellinenyhdistys.fi/wp-content/uploads/2014/09/huuki-kopsakangas-svento.pdf>.

81. M. Kara & S. Syri & A. Lehtilä & S. Helynen et al. The impacts of EU CO2 emissions trading on electricity markets and electricity consumers in Finland. Energy Economics. [Verkkolehti]. Vol. 30:2. 2008. S. 193-211. [Viitattu 7.3.2019]. ISSN 0140-9883. Saatavissa: DOI:10.1016/j.eneco.2006.04.001.

82. Smart Energy Transition. Tuulivoima ja kysyntäjousto aiheuttavat murroksen sähkömarkkinoilla – miksi ja miten?. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.3.2019]. Saatavissa: <http://smartenergytransition.fi/fi/tuulivoima-ja-kysyntajousto-aiheuttavat-murroksen-sahkomarkkinoilla-miksi-ja-miten/>.

83. Nord Pool. Day-ahead prices. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 12.3.2019]. Saatavissa: <https://www.nordpoolgroup.com/Market-data/Dayahead/Area-Prices/ALL1/Hourly/?view=chart>.

84. Fingrid. Varttitase eli 15 minuutin taseselvitysjakso. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/sahkomarkkinat/sahkomarkkinoiden-tulevaisuus/varttitase/>.

85. Copenhagen Economics. Finer time resolution in Nordic power markets: A Cost Benefit Analysis. [Verkkoaineisto]. 2017. 69 s. [Viitattu 22.5.2019]. Saatavissa: <https://www.copenhageneconomics.com/dyn/resources/Publication/publication-PDF/5/415/1512997344/finer-time-resolution-cba-report-final.pdf>.

86. Energiateollisuus. Energiateollisuus ry:n (ET) näkemys varttimittaukseen siirtymisen aikataulusta jakeluverkoissa. [Verkkoaineisto]. 2019. 13 s. [Viitattu 22.5.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/3526/Varttimittaus_kantapaperi_20190213_FINAL.pdf.

87. Energiateollisuus. Sidosryhmäkysely 15 minuutin tasejaksoon siirtymisestä. [Verkkoaineisto]. 2018. 6 s. [Viitattu 22.5.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/2279/Energiavirasto_Sidosryhmäkysely_15_minuutin_tasejaksoon_siirtymisesta_20180124.pdf.
88. A. Raininko. Kuluttajan aktivointiin tähtäävät toimenpiteet Euroopan sähkömarkkinoilla. [Verkkoaineisto]. Erikoistyö. Aalto-yliopisto, sähkötekniikan korkeakoulu. Espoo, 2015. 64 s. [Viitattu 11.3.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/498/EUn_sahkon_vahitaismarkkinat.pdf.
89. J. Valkama. Sähköverkkotoiminta ja sen kohtuullinen hinnoittelu. [Verkkoaineisto]. Pro Gradu -tutkielma. Tampereen yliopisto, johtamiskorkeakoulu. Tampere, 2014. 57 s. [Viitattu 11.3.2019]. Saatavissa: <https://tampub.uta.fi/bitstream/handle/10024/95124/GRADU-1395929721.pdf?sequence=1>.
90. Finlex. Sähkömarkkinalaki 588/2013. [Verkkoaineisto]. 2013. [Viitattu 11.3.2019]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130588>.
91. Energiateollisuus. Sähkön hinta pähkinänkuoressa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.3.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/624/Sahkon_hinta_-esite.pdf.
92. Energiateollisuus. Sähkön hinta koostuu kolmesta osasta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.3.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_hinta.
93. Energiavirasto. Sähkön hinta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.3.2019]. Saatavissa: <https://www.energiavirasto.fi/sahkon-hinta>.
94. Energiateollisuus. Hajautettua sähkön pientuotantoa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.4.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/asiakkaat/sahkoasiakkuus/sahkon_pientuotanto.
95. Vero. Sähkön ja eräiden polttoaineiden vero. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.4.2019]. Saatavissa: https://www.vero.fi/yritykset-ja-yhteisot/tietoa-yritysverotuksesta/valmisteverotus/valmisteverolajit/sahko_ja_eraat_polttoaineet/.
96. Motiva. Ylijäämänsähkön myynti. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.4.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/aurinkosahko/aurinkosahkojarjestelman_kaytto/ylijaamasahkon_myynti.
97. Energiateollisuus. Kaukolämmön hinta pähkinänkuoressa. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavissa: http://www.wse.fi/filebank/12-et_kaukol_hinta_esite_160911.pdf.
98. Motiva. Kaukolämmön hinta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/rakentaminen/lammitysjarjestelman_valinta/lammitysmuodot/kaukolampo/kaukolammon_hinta.
99. Helen. Mistä hinta muodostuu?. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 14.3.2019]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/lampo/kodit/hinnat/mista-hinta-muodostuu/>.

100. J. Ma & J. Qin & T. Salsbury & P. Xu. Demand reduction in building energy systems based on economic model predictive control. Chemical Engineering Science. [Verkkolehti]. Vol. 67:1. 2012. S. 92-100. [Viitattu 3.5.2019]. ISSN 0009-2509. Saatavissa: DOI:10.1016/j.ces.2011.07.052.
101. Energiateollisuus. Kulutusjousto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 6.5.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiamarkkinat/sahkomarkkinat/kulutusjousto.
102. Pöyry. Kysyntäjoustop liiketoimintamallit ja toimijoiden roolit. [Verkkoaineisto]. 2016. 17 s. [Viitattu 6.5.2019]. Saatavissa: https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/yhtio/teki-toiminta/raportit/kysyntajousto-roolit-alustus-poyry-2016_10_19-alyverkko-tyoryhma.pdf.
103. P. Bertoldi & P. Zancanella & B. Boza-Kiss. Demand Response status in EU Member States. [Verkkoaineisto]. 2016. 153 s. [Viitattu 6.5.2019]. Saatavissa: <http://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC101191/Idna27998enn.pdf>.
104. S. Annala & G. Mendes & S. Honkapuro et al. Comparison of Opportunities and Challenges in Demand Response Pilots in Finland and Portugal. 2018 15th International Conference on the European Energy Market (EEM). 2018. S. 1-5. [Viitattu 6.5.2019]. ISSN 2165-4093. Saatavissa: DOI:10.1109/EEM.2018.8469894.
105. M. H. Albadi & E. F. El-Saadany. A summary of demand response in electricity markets. Electric Power Systems Research. [Verkkolehti]. Vol. 78:11. 2008. S. 1989-1996. [Viitattu 6.5.2019]. ISSN 0378-7796. Saatavissa: DOI:10.1016/j.epsr.2008.04.002.
106. I. Lampropoulos & W. L. Kling & P. F. Ribeiro et al. History of demand side management and classification of demand response control schemes. IEEE Power & Energy Society General Meeting. [Verkkolehti]. 2013. S. 1-5. [Viitattu 21.4.2020]. ISSN 1932-5517. Saatavissa: DOI:10.1109/PESMG.2013.6672715.
107. Smart Energy Demand Coalition. Demand Response: Clarification of the standard processes required between BRPs and independent aggregators. [Verkkoaineisto]. 2015. 8 s. [Viitattu 7.5.2019]. Saatavissa: <http://www.smartenergy.eu/wp-content/uploads/2015/07/SEDC-Standard-processes-required-between-BRPs-and-independent-aggregators.pdf>.
108. F. Shariatzadeh & P. Mandal & A. K. Srivastava. Demand response for sustainable energy systems: A review, application and implementation strategy. Renewable and Sustainable Energy Reviews. [Verkkolehti]. Vol. 45. 2015. S. 343-350. [Viitattu 22.5.2019]. ISSN 1364-0321. Saatavissa: DOI:10.1016/j.rser.2015.01.062.
109. Energiateollisuus. Kaukolämmön tuotanto. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 13.5.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/perustietoa_energia-alasta/energiantuotanto/kaukolammon_tuotanto.

110. Energiateollisuus. Kaukolämmön kysyntäjousto. [Verkkoaineisto]. 2015. 32 s. [Viitattu 13.5.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/439/Kaukolammon_kysyntajousto_loppuraportti_VALOR.pdf.
111. Smart Energy Transition. Muutospolku 3: Kaukolämmön kysyntäjousto. [Verkkoaineisto]. 2017. 19 s. [Viitattu 13.5.2019]. Saatavissa: <http://www.smartenergytransition.fi/tiedostot/murrosareena-polku3-kaukolammon-kysyntajousto.pdf>.
112. F. Wernstedt & P. Davidsson & C. Johansson. Demand Side Management in District Heating Systems. Proceedings of the 6th international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems. 2007. S. 1-7. [Viitattu 13.5.2019]. ISBN 978-81-904262-7-5. Saatavissa: DOI:10.1145/1329125.1329454.
113. Capgemini. Demand Response: a decisive breakthrough for Europe. [Verkkoaineisto]. 2008. 32 s. [Viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: https://www.capgemini.com/wp-content/uploads/2017/07/Demand_Response_a_decisive_breakthrough_for_Europe.pdf.
114. European Parliament. The Potential of Electricity Demand Response. [Verkkoaineisto]. 2017. 66 s. [Viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/607322/IPOL_STU\(2017\)607322_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2017/607322/IPOL_STU(2017)607322_EN.pdf).
115. European Commission. Delivering a New Deal for Energy Consumers. [Verkkoaineisto]. 2015. 10 s. [Viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/documents/1_EN_ACT_part1_v8.pdf.
116. S. Karjalainen. Should we design buildings that are less sensitive to occupant behaviour? Energy Efficiency. [Verkkolehti]. Vol. 9:6. 2016. S. 1257-1270. [Viitattu 20.5.2019]. ISSN 1570-6478. Saatavissa: DOI:10.1007/s12053-015-9422-7.
117. K. Sun & T. Hong. A simulation approach to estimate energy savings potential of occupant behavior measures. Energy and Buildings. [Verkkolehti]. Vol. 136. 2017. S. 43-62. [Viitattu 20.5.2019]. ISSN 0378-7788. Saatavissa: DOI:10.1016/j.enbuild.2016.12.010.
118. Smart Energy Transition. Muutospolku 5: Käyttäytymisen muutos. [Verkkoaineisto]. 2017. 19 s. [Viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: <http://www.smartenergytransition.fi/tiedostot/murrosareena-polku5-kayttaytymisen-muutos.pdf>.
119. Motiva. Vedenkulutus taloyhtiössä. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: https://www.motiva.fi/koti_ja_asuminen/taloyhtiot/energiaeksperttitoiminta/tieto_energian_ja_vedenkulutuksesta/vedenkulutus_taloyhtiassa.
120. Smart Energy Transition. Sähkön kysyntäjouston kasvu edellyttää hintakannustimia ja rakentamisen ohjausta. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.5.2019]. Saatavissa: <http://smartenergytransition.fi/fi/sahkon-kysyntajouston-kasvu-edellyttaa-hintakannustimia-ja-rakentamisen-ohjausta/>.
121. There Corporation. Kysynnänjouston pilottiprojekti. [Verkkoaineisto]. 2016. 9 s. [Viitattu 23.5.2019]. Saatavissa: <https://www.fingrid.fi/globalassets/dokumentit/fi/sahkomarkkinat/kysyntajousto/kysynnänjouston-pilottiprojekti-loppuraportti-julkinen.pdf>.

122. P. Harsia & S. Penttinen & P. Järventausta et al. Edellytykset kysyntäjoustop toteutmiselle kiinteistössä. [Verkkoaineisto]. 2017. 7 s. [Viitattu 28.5.2019]. Saatavissa: <https://tt.eduuni.fi/sites/EL-TRAN/Julkiset%20tiedostot/Pirkko%20Harsia%20et%20al.,%20Edellytykset%20kysynt%C3%A4joustop%20toteutmiselle%20kiinteist%C3%B6ss%C3%A4.pdf>.
123. Aalto Green Campus. TUAS-talon kaukolämmön kysyntäjoustop. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.5.2019]. Saatavissa: <https://aaltogreencampus.fi/kampus-muutoksessa/caset/tuas-talon-kaukolammon-kysyntajoustop>.
124. Green Building Council Finland. Tiivistelmä maaliskuun älyteknologioita ja energiatehokkuutta käsitelleestä Vihreästä foorumista. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 21.5.2019]. Saatavissa: https://figbc.fi/vihrea_foorumi_16-3_yhteenveto/.
125. Kristian Martin. Demand response of heating and ventilation within educational office buildings. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo, 2017. 124 s. [Viitattu 21.4.2020]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/29149>.
126. Aleksi Mäki. Demand response of space heating using model predictive control in an office building. Diplomityö. Aalto-yliopisto, Insinööritieteiden korkeakoulu. Espoo, 2018. 107 s. [Viitattu 21.4.2020]. Saatavissa: <https://aaltodoc.aalto.fi/handle/123456789/35455>.
127. J. Pietiläinen & T. Kauppinen & K. Kovanen & V. Nykänen et al. Rakennuksen toimivuuden varmistaminen energiatehokkuuden ja sisäilmaston kannalta. VTT Tiedotteita 2413. [Verkkoaineisto]. Espoo. 2007. 235 s. ISSN 1235-0605. [Viitattu 1.7.2019]. Saatavissa: <https://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2007/T2413.pdf>.
128. HOLISDER. D3.3. HOLISDER Explicit Demand Response Framework and Integration into Holistic (Implicit-Explicit) DR Optimization Strategies. [Verkkoaineisto]. 2019. 78 s. [Viitattu 2.7.2019]. Saatavissa: http://holisder.eu/reports/HOLISDER_D3.3_HOLISDER_Explicit_Demand_Response_Framework_and_Integration_into_Holistic_Implicit-Explicit_DR_Optimization_Strategies.pdf.
129. HOLISDER. D2.3. Ex-Ante Pilot Audits and Pilot Deployment Plan. [Verkkoaineisto]. 2019. 43 s. [Viitattu 8.7.2019]. Saatavissa: http://holisder.eu/reports/HOLISDER_D2.3_Ex-Ante_Pilot_Audits_and_Pilot_Deployment_Plan.pdf.
130. Talotekniikkainfo. Sisäilmasto ja ilmanvaihto -opas. [Verkkoaineisto]. 2018. 56 s. [Viitattu 16.9.2019]. Saatavissa: https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/talotekniikkainfo_sisisailmasto_ja_ilmanvaihto_opas_30.1.2018.pdf.
131. Energateollisuus. Rakennusten kaukolämmitys. K1/2013. [Verkkoaineisto]. 2014. 106 s. [Viitattu 16.9.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/502/JulkaisuK1_2013_20140509.pdf.
132. Terveiden ja hyvinvoinnin laitos. Legionella, ympäristötekijät ja torjuntamahdollisuudet. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 16.9.2019]. Saatavissa: <https://thl.fi/fi/web/ymparisto-terveys/vesi/legionellabakteerit-vesijarjestelmissa/ymparistotekijat-ja-torjuntamahdollisuudet>.

133. RT 07-11299. Sisäilmastoluokitus 2018. Sisäympäristön tavoitearvot, suunnitteluohjeet ja tuotevaatimukset. [Verkkoaineisto]. Rakennustieto. 2018. 24 s. [Viitattu 16.9.2019]. Saatavissa: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%2007-11299>.
134. RT RakMK-21752. Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen sisäilmastosta ja ilmanvaihdesta. Suomen säädöskokoelma 1009/2017. [Verkkoaineisto]. Rakennustieto. 2018. 8 s. [Viitattu 16.9.2019]. Saatavissa: <https://kortistot.rakennustieto.fi/kortit/RT%20RakMK-21752>.
135. SFS-EN 12464-1. Valo ja valaistus. Työkohteiden valaistus. Osa 1: Sisätilojen työkohteiden valaistus. [Verkkoaineisto]. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 2011. 95 s. [Viitattu 16.9.2019]. Saatavissa: <https://sales.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFSSahko/CEN/ID2/1/174269.html.stx>.
136. HOLISDER. D4.1. Analysis of EU-wide interoperability standards and data models and harmonization requirements. [Verkkoaineisto]. 2018. 43 s. [Viitattu 10.10.2019]. Saatavissa: http://holisder.eu/reports/HOLISDER_D4.1_Analysis_of_EU-wide_interoperability_standards_and_data_models_and_harmonization_requirements.pdf.
137. HOLISDER. D4.4. HOLISDER Interoperable Platform and Data Management Framework Final Version. [Verkkoaineisto]. 2019. 62 s. [Viitattu 10.10.2019]. Saatavissa: http://holisder.eu/reports/HOLISDER_D4.4_HOLISDER%20Interoperable%20Platform%20and%20Data%20Management%20Framework%20Final%20Version_V1.0.pdf.
138. HOLISDER. D2.5. HOLISDER Framework Architecture including functional, technical and communication specifications. [Verkkoaineisto]. 2018. 144 s. [Viitattu 10.10.2019]. Saatavissa: http://holisder.eu/reports/HOLISDER_D2.5_HOLISDER_Framework_Architecture_including_functional_technical_and_communication_specifications.pdf.
139. HOLISDER. D3.2. HOLISDER Implicit Demand Response Framework and Associated Strategies. [Verkkoaineisto]. 2019. 51 s. [Viitattu 10.10.2019]. Saatavissa: http://holisder.eu/reports/HOLISDER_D3.2_HOLISDER_Implicit_Demand_Response_Framework_and_Associated_Strategies.pdf.
140. Energiateollisuus. Kaukolämmön mittaus. K13/2008. [Verkkoaineisto]. 2008. 71 s. [Viitattu 12.8.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/589/SuositusK13_2008_KL-mittaus.pdf.
141. Helen. Kaukolämmön energia- ja vesivirtamaksut 1.10.2019 alkaen. [Verkkoaineisto]. 2019. 3 s. [Viitattu 30.9.2019]. Saatavissa: https://www.helen.fi/globalassets/hinnastot-ja-sopimusehdot/lampo-ja-jaahdytys/kotitaloudet/kaukol%C3%A4mm%C3%B6n-energia-ja-vesivirtamaksut-2019_10.pdf.
142. Energiateollisuus. Teho ja vesivirta kaukolämmön maksuperusteina. K15/2014. [Verkkoaineisto]. 2014. 36 s. [Viitattu 30.9.2019]. Saatavissa: https://energia.fi/files/586/Teho_ja_vesivirta_SuositusK15_2014.pdf.

143. Helen. Sähkötuotteet pienyrityksille. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 30.9.2019]. Saatavissa: <https://www.helen.fi/sahko/yritykset/sahkotuotteet-yritykselle>.
144. Helen Sähköverkko. Sähkön siirtohinnoista. [Verkkoaineisto]. 2018. 1 s. [Viitattu 30.9.2019]. Saatavissa: <https://www.helensahkoverkko.fi/globalassets/hinnastot-ja-sopimusehdot/hsv/sahkon-siirtohinnoista.pdf>.
145. Helen Sähköverkko. Jakeluverkon sähkönkäyttöpaikkojen loistehon kompensointiohje. [Verkkoaineisto]. 2016. 3 s. [Viitattu 30.9.2019]. Saatavissa: <https://www.helensahkoverkko.fi/globalassets/hsv/palvelut/ohjeet/jakeluverkon-sahkonkayttopaikkojen-loistehon-kompensointiohje.pdf>.
146. ANSI/ASHRAE Standard 55-2010. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. [Verkkoaineisto]. 2010. 40 s. [Viitattu 21.4.2020]. ISSN 1041-2336. Saatavissa: <http://arco-hvac.ir/wp-content/uploads/2015/11/ASHRAE-55-2010.pdf>.
147. EEN-E4001 Comfortable and Healthy Indoor Environments – Course material. Thermal Comfort. Aalto University. [Verkkoaineisto]. 2018. 48 s. [Viitattu 20.4.2020]. Saatavissa: https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/611546/mod_resource/content/1/EEN-E4001%20lecture%204%20.pdf.
148. Ilmatieteen laitos. Havaintojen lataus. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 2.4.2020]. Saatavissa: <https://ilmatieteenlaitos.fi/havaintojen-lataus#!/>.
149. J. Virta & P. Pylsy. Taloyhtiön energiakirja. [Verkkoaineisto]. Helsinki. 2011. 192 s. ISSN 1457-5736. [Viitattu 25.4.2020]. Saatavissa: https://issuu.com/mediat/docs/taloyhtion_energiakirja.
150. Suomen RakMK D2. Rakennusten sisäilmasto ja ilmanvaihto. [Verkkoaineisto]. Helsinki: Ympäristöministeriö, Rakennetun ympäristön osasto. 2012. 34 s. [Viitattu 24.4.2020]. Saatavissa: https://www.finlex.fi/data/normit/37187-D2-2012_Suomi.pdf.

Liiteluettelo

Liite 1. Kaukolämmön vesivirtamaksut. 3 sivua.

Liite 2. Asuinkerrostalon lähtötilanteen energiankulutus. 1 sivu.

Liite 3. Asuinkerrostalon lopputilanteen energiankulutus. 1 sivu.

Liite 1. Kaukolämmön vesivirtamaksut

Taulukko L1.1. Kaukolämmön vesivirtamaksujen hinnasto Suomen pilottikohteissa, ALV 24 % [141].

Sopimusvesivirta [m ³ /h]	Vesivirtamaksu [€/kk]
0,00	0,00
0,10	43,08
0,15	61,25
0,20	79,42
0,25	97,60
0,30	115,77
0,35	132,37
0,40	148,11
0,45	163,84
0,50	179,58
0,55	195,32
0,60	211,05
0,65	226,79
0,70	242,53
0,75	258,27
0,80	274,00
0,85	289,74
0,90	305,48
0,95	321,21
1,00	336,95
1,10	368,42
1,20	399,90
1,30	431,37
1,40	462,85
1,50	494,32
1,60	525,79
1,70	557,27
1,80	588,74
1,90	620,21
2,00	651,69
2,10	677,80
2,20	701,77
2,30	725,73
2,40	749,69
2,50	773,65
2,60	797,61
2,70	821,58

2,80	845,54
2,90	869,50
3,00	893,46
3,20	941,39
3,40	989,31
3,60	1 037,24
3,80	1 085,16
4,00	1 133,08
4,40	1 228,93
4,80	1 324,78
5,20	1 386,73
5,60	1 442,79
6,00	1 498,84
6,40	1 554,90
6,80	1 610,95
7,20	1 667,01
7,60	1 723,06
8,00	1 779,12
8,40	1 835,17
8,80	1 891,23
9,20	1 947,28
9,60	2 003,34
10,00	2 059,39
11,00	2 199,53
12,00	2 339,67
13,00	2 479,81
14,00	2 619,95
15,00	2 760,08
16,00	2 893,36
17,00	2 997,01
18,00	3 100,67
19,00	3 204,32
20,00	3 307,98
22,00	3 515,29
24,00	3 722,61
26,00	3 929,92
28,00	4 137,23
30,00	4 344,54
32,00	4 551,86
34,00	4 759,17
36,00	4 966,48
38,00	5 173,79
40,00	5 381,11
42,00	5 588,42

44,00	5 795,73
46,00	6 003,04
48,00	6 210,36
50,00	6 417,67
52,00	6 624,98
54,00	6 832,29
56,00	7 039,61
58,00	7 246,92
60,00	7 454,23
65,00	7 938,32
70,00	8 373,81
75,00	8 809,30
80,00	9 244,79
85,00	9 680,28
90,00	10 115,78
100,00	10 986,76
110,00	11 857,74
120,00	12 728,72
130,00	13 599,70
140,00	14 470,68
150,00	15 341,67
160,00	16 212,65
170,00	17 083,63
180,00	17 954,61
190,00	18 825,59
200,00	19 696,58
220,00	21 438,54
440,00	40 600,14

Liite 2. Asuinkerrostalon lähtötilanteen energiankulutus

Taulukko L2.1. Asuinkerrostalon veden, sähkön ja kaukolämmön kulutus vuorokauden 25.3.2019 aikana.

Päivämäärä	Aika	Vedenkulutus [m ³]	Sähkönkulutus [kWh]	Kaukolämmön kulutus [MWh]
25.3.2019	0:00	0,70	16,56	0,042
25.3.2019	1:00	0,45	16,24	0,041
25.3.2019	2:00	0,36	16,28	0,046
25.3.2019	3:00	0,06	16,32	0,038
25.3.2019	4:00	0,12	16,30	0,038
25.3.2019	5:00	0,09	16,19	0,034
25.3.2019	6:00	0,51	16,29	0,047
25.3.2019	7:00	0,94	16,70	0,057
25.3.2019	8:00	1,14	15,54	0,056
25.3.2019	9:00	1,10	14,92	0,052
25.3.2019	10:00	1,44	15,27	0,067
25.3.2019	11:00	1,31	16,37	0,053
25.3.2019	12:00	1,45	17,76	0,060
25.3.2019	13:00	0,86	19,09	0,044
25.3.2019	14:00	0,90	17,95	0,044
25.3.2019	15:00	0,76	21,49	0,033
25.3.2019	16:00	0,56	28,51	0,029
25.3.2019	17:00	1,33	23,21	0,052
25.3.2019	18:00	1,28	23,57	0,056
25.3.2019	19:00	1,30	22,36	0,058
25.3.2019	20:00	1,74	22,27	0,083
25.3.2019	21:00	1,61	21,71	0,084
25.3.2019	22:00	1,29	17,14	0,072
25.3.2019	23:00	1,15	17,00	0,075

Liite 3. Asuinkerrostalon lopputilanteen energiankulutus

Taulukko L3.1. Asuinkerrostalon veden, sähkön ja kaukolämmön kulutus vuorokauden 16.3.2020 aikana.

Päivämäärä	Aika	Vedenkulutus [m ³]	Sähkönkulutus [kWh]	Kaukolämmön kulutus [MWh]
16.3.2020	0:00	1,30	16,63	0,060
16.3.2020	1:00	0,94	15,99	0,047
16.3.2020	2:00	0,51	14,15	0,034
16.3.2020	3:00	0,30	14,55	0,024
16.3.2020	4:00	0,51	16,94	0,034
16.3.2020	5:00	0,07	16,09	0,022
16.3.2020	6:00	0,05	15,70	0,021
16.3.2020	7:00	0,21	14,73	0,042
16.3.2020	8:00	0,57	15,94	0,056
16.3.2020	9:00	1,18	18,11	0,072
16.3.2020	10:00	1,00	17,84	0,055
16.3.2020	11:00	1,60	19,05	0,075
16.3.2020	12:00	1,31	19,79	0,067
16.3.2020	13:00	1,11	18,57	0,065
16.3.2020	14:00	1,05	18,67	0,048
16.3.2020	15:00	1,28	5,21	0,059
16.3.2020	16:00	1,86	14,38	0,078
16.3.2020	17:00	1,18	20,95	0,057
16.3.2020	18:00	0,72	21,02	0,036
16.3.2020	19:00	1,28	17,43	0,046
16.3.2020	20:00	0,98	24,34	0,045
16.3.2020	21:00	1,26	23,50	0,050
16.3.2020	22:00	1,32	17,44	0,046
16.3.2020	23:00	1,50	16,73	0,058